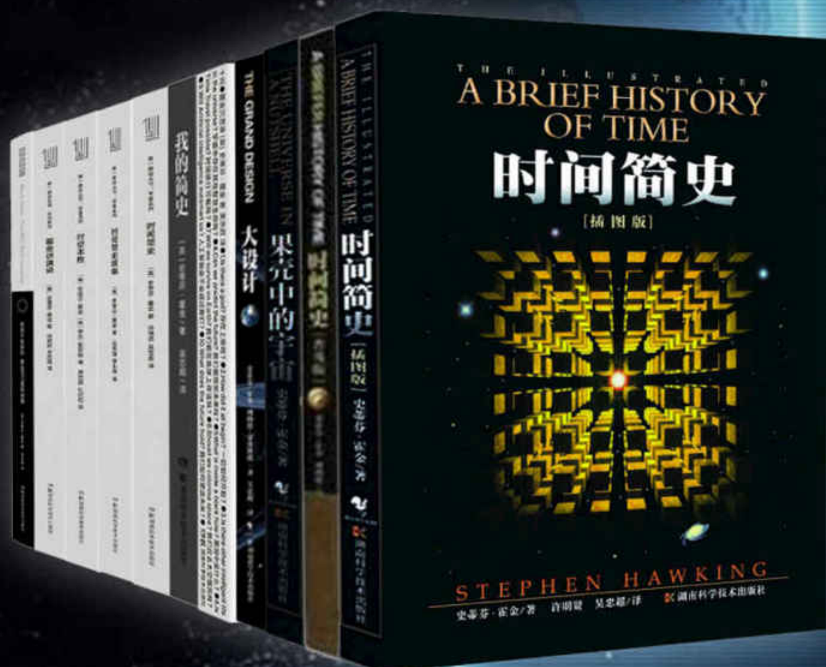
史蒂芬·霍金

中文版著作全集（套装共11册）



湖南科学技术出版社

VISIT…

LANZAROTE Caliente.COM

史蒂芬·霍金

中文版著作全集（套装共11册）



湖南科学技术出版社

目录

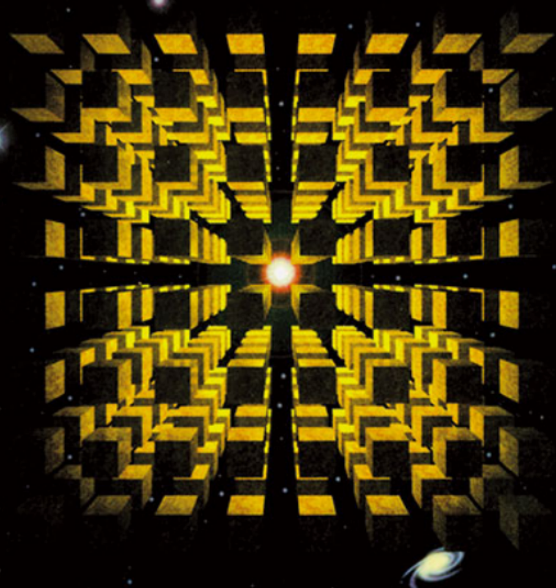
时间简史（插图版）
时间简史（普及版）
果壳中的宇宙
大设计
十问：霍金沉思录
我的简史
时间简史
时间简史续编
时空本性
霍金讲演录
黑洞不是黑的：霍金BBC里斯讲演

THE ILLUSTRATED

A BRIEF HISTORY OF TIME

时间简史

[插图版]



STEPHEN HAWKING

史蒂芬·霍金/著　许明贤　吴忠超/译

湖南科学技术出版社

版权信息

The Illustuated A Brief History of Time

Copyright©1996 by Stephen. Hawking.

Interior illustrations copyright©1996 by Ron Miller.

Published by arrangemen with Writer's House Inc.

through Bardon-Chinese Media Agency

ALL RIGHTS RESERVED.

湖南科学技术出版社通过台湾博达著作权代理公司获得本书中文简体版中国大陆地区独家出版发行权。

版权登记号：18-2001-83

版权所有，侵权必究。

时间简史：（插图本）/（英）霍金（HaWking， S.）著；许明贤，吴忠超译.——长沙：湖南科学技术出版社，2007（2009.12重印）

ISBN 978-7-5357-3230-9

I.时…　II.①霍…②许…③吴…　III.宇宙学-普及读物　IV.P159-49

中国版本图书馆CIP数据核字（2009）第200743号

时间简史（插图版）

著　　者：史蒂芬·霍金

译　　者：许明贤　吴忠超

责任编辑：孙桂均

文字编辑：陈一心

出版发行：湖南科学技术出版社

社　　址：长沙市湘雅路276号

http：//www.hnstp.com

邮购联系：本社直销科0731-84375808

印　　刷：湖南天闻新华印务有限公司

（印装质量问题请直接与本厂联系）

厂　　址：湖南望城·湖南出版科技园

邮　　编：410219

出版日期：2015年7月第1版第35次

开　　本：710mm×970mm 1/16

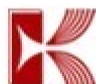
印　　张：16.125

字　　数：171000

书　　号：ISBN 978-7-5357-3230-9

定　　价：45.00元

（版权所有·翻印必究）



湖南科学技术出版社
HUNAN SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS

目录

版权信息
译者序
前言
第一章 我们的宇宙图象
第二章 空间和时间
第三章 膨胀的宇宙
第四章 不确定性原理
第五章 基本粒子和自然的力
第六章 黑洞
第七章 黑洞不是这么黑的
第八章 宇宙的起源和命运
第九章 时间箭头
第十章 虫洞和时间旅行
第十一章 物理学的统一
第十二章 结论
阿尔伯特·爱因斯坦
伽利略·伽利雷
艾萨克·牛顿
小辞典
感谢

译者序

宇宙学是一门既古老又年轻的学科。作为宇宙中高等生物的人类不满足于自身的生存和种族的绵延，还一代代地探索着存在和生命的意义。但是，人类理念的进化是极其缓慢和艰苦的，从亚里士多德-托勒密地心说到哥白尼-伽利略日心说的演化就花了大约2000年的时间。令人吃惊的是，尽管人们知道世间的一切都在运动，只有到了20世纪20年代哈勃发现了红移定律后，宇宙演化的观念才进入人类的意识。在此之前，人们甚至从未想到过宇宙还会演化。无论是牛顿的万有引力理论还是爱因斯坦的广义相对论都不能得到稳态的宇宙模型。为了得到一个这样的模型，爱因斯坦甚至不惜牺牲理论的美丽，将宇宙常数引进他的方程。可见宇宙演化的观念并非产生于这些天才的头脑之中。

哈勃的发现标志着现代宇宙学的诞生。他的红移定律说，从星系光谱的红移可以推断，越远的星系以越快的速度飞离开我们，这表明整个宇宙处于膨胀的状态。从时间上倒溯到过去，估计在100亿到200亿年之前发生过一次开天辟地的大爆炸，宇宙就从这个极其紧致极热的状态中诞生。伽莫夫在1948年发表的关于热大爆炸模型的文章中作出了一个惊人的预言，早期大爆炸的辐射仍残存在我们的周围，不过由于宇宙膨胀引起的红移，其绝对温度只余下几度了。在这种温度下，辐射处于微波的波段。然而，在1965年彭齐亚斯和威尔逊观测到宇宙微波背景辐射之前，人们并不认真对待这个预言。

一般认为，爱因斯坦的广义相对论是描述宇宙的正确理论。在经典广义相对论的框架中，霍金和彭罗斯，在很一般的条件下，证明了时空一定存在奇点，最著名的奇点即是黑洞里的奇点和宇宙大爆炸处的奇点。所有定律和可预见性都在奇点处失效。奇点可以看做时空的边缘或边界。只有给定了奇点处的边界条件，才能从爱因斯坦方程得出宇宙的演化。由于边界条件只能由宇宙外的造物主给定，所以宇宙的命运就操纵在造物主手中。这就是从牛顿时代起一直困扰人类智慧的第一推动问题。

如果时空没有边界，则就不必劳驾上帝进行第一推动了。这只有在

量子引力论中才能做到。霍金认为宇宙的量子态是处于一个基态，而时空可被看成是一个有限无界的四维面，正如地球的表面一样，只不过多了两个维数而已。宇宙中的所有结构都起源于量子力学的不确定性原理允许的最小起伏。从一些简单的模型计算可得出和天文观测相一致的推论，如星系团、星系、恒星等成团结构，宇宙大尺度的均匀性和各向同性，时空的平性，时空的维数，太初引力波和太初黑洞，以及时间的箭头等。霍金的量子宇宙学在于它真正使宇宙论成为一门成熟的科学。它是一个自足的理论，即在原则上，单凭科学定律我们便可以将宇宙中的一切都预言出来。

本书作者是当代最重要的广义相对论家和宇宙学家。

20世纪70年代他和彭罗斯一道证明了著名的奇点定理。之后他还证明了黑洞的面积定理，即随着时间增加黑洞的表面积不减。这很自然地使人将这面积和热力学的熵联想起来。

1973年，他考虑黑洞附近的量子效应，发现黑洞会像黑体那样发出辐射。其辐射的温度和黑洞质量成反比，这样黑洞就会因为辐射而慢慢变小，而温度却越变越高，它以最后一刻的爆炸而告终。黑洞辐射的发现具有极其基本的意义，它将引力、量子力学和热力学统一在一起。

1974年以后，他的研究转向量子引力论。他利用费恩曼的对历史求和方法，自然地处理时空的非平凡的拓扑效应，开创了引力热力学。

1980年，他的兴趣转向量子宇宙学，研究宇宙的无中生有的创生机制，企图一劳永逸地解决第一推动问题。

霍金的生平是非常富有传奇性的。在科学成就上，他是有史以来最杰出的科学家之一，而他的贡献是在他20年之久被肌萎缩性（脊椎）侧索硬化症禁锢在轮椅上的情形下做出的，这真正是空前的。因为他的贡献对于人类的观念有深远的影响，所以媒体对他早已广为报道。尽管如此，译者之一于1979年第一回见到他时的情景至今还历历在目。那是第一次参加他领导的小组的讨论班时，门打开后，忽然脑后响起一种非常微弱的电器的声音，回头一看，只见一个骨瘦如柴的人斜躺在电动轮椅上，他自己驱动着电开关。译者尽量保持礼貌而不显出过分吃惊，但是他对首次见到他的人对其残废程度的吃惊早已习惯。他要很费劲才能抬起头来。在失声之前，他只能用非常微弱的变形的语言交流，这种语言

只有在陪他工作、生活几个月后才能通晓。他不能写字，看书必须依赖于一种翻书页的机器，读文献时必须让人将每一页摊平在一张大办公桌上，然后他驱动轮椅如蚕吃桑叶般地逐页阅读。人们不得不对人类中居然有以这般坚强意志追求终极真理的灵魂从内心产生深深的敬意。他每天必须驱动轮椅从他的家——剑桥西路5号，经过美丽的剑河、古老的国王学院驶到银街的应用数学和理论物理系的办公室。该系为了他的轮椅行走方便特地修了一段斜坡。

在富有学术传统的剑桥大学，他目前担任着也许是有史以来最为崇高的教授职务，那是牛顿和狄拉克担任过的卢卡斯数学教授。

本书译者之一曾受教于霍金达4年之久，并在他的指导下完成了博士论文。从他对译者私事的帮助可以体会到，他是一位富有人情味的人。此书即是受霍金之托而译成中文，以供人类1/5的人口了解他的学说。

许明贤　吴忠超

1988年8月，尼亚加拉瀑布

前言

我没有为《时间简史》的原版写前言。那是卡尔·萨根写的。我写了简短的“感谢”，有人建议我感谢每一个人。但是有些支持过我的基金会不甚高兴，它们由于我提及而收到大量的申请。

我认为没有任何人，我的出版者，代理人，甚至我自己曾预料到这本书会这么畅销。它荣登伦敦《星期日时报》畅销书榜237周，这比任何书都久（显然，《圣经》和莎士比亚不算在内）。它被译成40来种文字，在全世界每750人都拥有一册，包括男人、妇女和儿童。正如纳珍·米尔伏德（我的前博士后）评论的：我的物理著作比麦当娜谈性的书还更好卖。

《时间简史》的成功表明，人们对于重大问题有广泛兴趣：诸如我们从何而来？宇宙为何是这样子的？

我已趁此机会更新本书，并将从首版（1988年4月愚人节）以来理论和观测的新结果纳入。我新添了虫洞和时间旅行的一章。爱因斯坦的广义相对论为我们提供了创生和维持虫洞的可能性，那是连接时空中不同区域的细管。如是，我们也许可以利用它们来进行星系之间快速旅行或在时间中旅行到过去。当然，我们从未邂逅到来自未来的人（也许我们曾经有过？）。对此我将给出一种可能的解释。

我还描述了今年在寻求“对偶性”或显然不同的物理理论之间的对应方面的进展。这些对应强烈地表明，存在一种完备的统一物理理论，但是它们也暗示，也许不可能用一个单独表述来表达这个理论。相反，在不同的情形下，我们必须使用基本理论的不同影像。这和描绘地球表面很相似，人们不能只用一张单独的地图，在不同的区域必须用不同的地图。这就变革了我们的科学定律的统一观，但是它并没有改变最重要的一点：一种我们能够发现并理解的合理的定律制约着宇宙。

在观测方面，迄今最主要的发展是由COBE（宇宙背景探险者）和其他合作者测量的宇宙微波背景辐射中的起伏。这些起伏是创生的指纹，这些在光滑均匀的早期宇宙上的微小的初始无规性后来成长为星

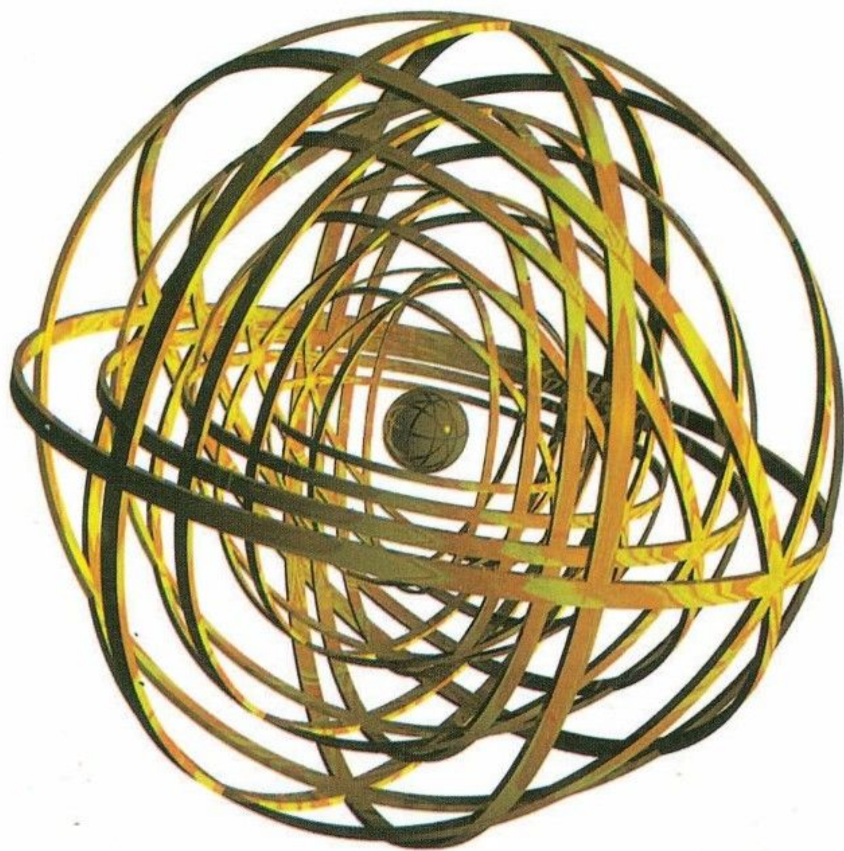
系、恒星以及在我们周围看到的所有结构。起伏的形式和无边界设想的预言相吻合。无边界设想说，宇宙在虚时间方向没有边界或边缘。为了区分这个设想和对背景中的起伏的其他可能的解释，还需要进一步的观测。然而，在几年之内，我们就应能知道，我们能否相信自己生活在一个完全自足的无始无终的宇宙之中。

史蒂芬·霍金

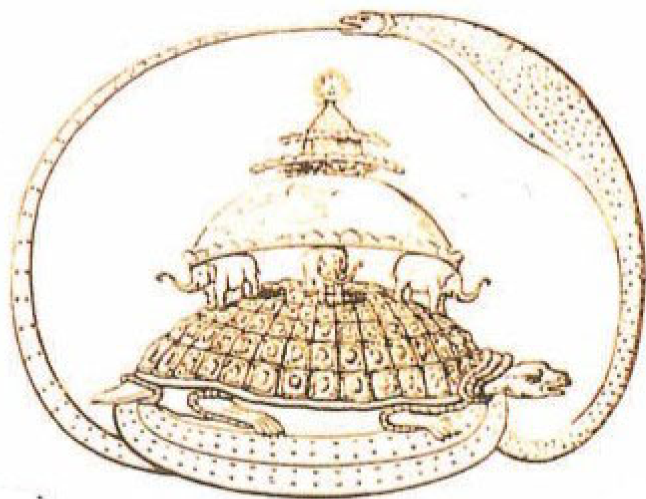


观测时间的过去这张有史以来最深处的太空的光学照片是哈勃空间望远镜于1996年1月拍摄的。它显示了早期宇宙的景象，其中某些星系的年代距离空间和时间启始少于10亿年。近年来非凡的技术进展，正在开始提示有关宇宙如何启始和我们在其中处境的理论背后的事实。

第一章　我们的宇宙图象



一位著名的科学家（据说是贝特兰·罗素）曾经作过一次天文学讲演。他描述了地球如何围绕着太阳公转，而太阳又是如何围绕着称之为我们星系的巨大的恒星集团的中心公转。演讲结束之际，坐在房间后排的一位小个老妇人起立说道："你讲的是一派胡言。实际上，世界是驮在一只巨大乌龟背上的平板。"这位科学家露出高傲的微笑，然后答道："那么这只乌龟是站在什么上面的呢？""你很聪明，年轻人，的确很聪明，"老妇人说，"不过，这是一只驮着一只，一直驮下去的乌龟塔啊！"



印度教宇宙把地球描写成驮在6只大象的背上，而地狱是由停留在蛇上的乌龟支持的。

大多数人会觉得，把我们的宇宙喻为一个无限的乌龟塔相当荒谬。但是我们凭什么就自认为知道得更好呢？我们对宇宙了解了多少？而我们又是如何知道的呢？宇宙从何而来，又将向何处去？宇宙有开端吗？如果有的话，在开端之前发生了什么？时间的本质是什么？它会有一个终结吗？物理学中最近的突破，使我们有可能为其中一些长期以来悬而未决的问题提供答案，而奇妙的新技术是实现这些突破的部分原因。对我们而言，这些答案也许有朝一日会变得和地球围绕着太阳公转那么显而易见——或许也会变得和乌龟塔一样荒谬，只有时间（不管其含义如何）才能裁决。



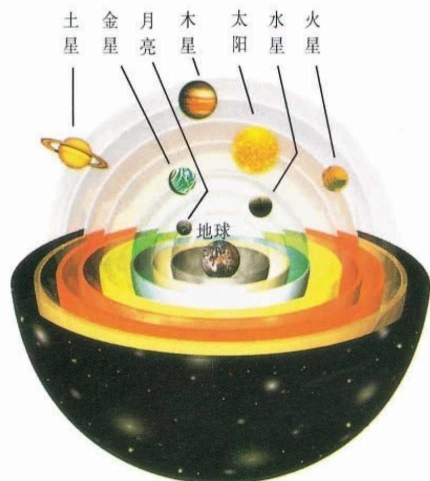
早期希腊人关于平坦宇宙概念的中世纪图解。地球在水上浮动，在它之上是4种元素。



图1.1 亚里士多德。公元前4世纪的希腊原作的罗马复制品。

早在公元前340年，希腊哲学家亚里士多德在他的《论天》一书中，就能够对于地球是一个圆球而不是一块平板这个信念提出两个有力的论证。第一，他意识到，月食是由于地球运行到太阳与月亮之间引起的。地球在月亮上的影子总是圆的，这只有在地球本身为球形的前提下才成立。如果地球是一块平坦的圆盘，除非月食总是发生在太阳正好位于这个圆盘中心的正下方的时刻，否则地球的影子就会被拉长而成为椭圆形。第二，希腊人从旅行中知道，在南方观测北极星，比在较北地区，北极星在天空中显得较低。（由于北极星位于北极的正上方，所以它出现在北极的观察者的头顶上，而对于赤道上的某观察者，北极星刚好出现在地平线上：图1.1。）

根据北极星在埃及和在希腊表观位置的差别，亚里士多德甚至估计出地球大圆长度为400000斯特迪亚。现在还不能准确地知道，1斯特迪亚的长度究竟是多少，但也许是200码（1码＝0.9144米）左右，这样就使得亚里士多德的估计大约为现在接受数值的2倍。希腊人甚至为地球是球形提供了第三个论证，否则何以从地平线驶来的船总是先露出船帆，然后才露出船身？



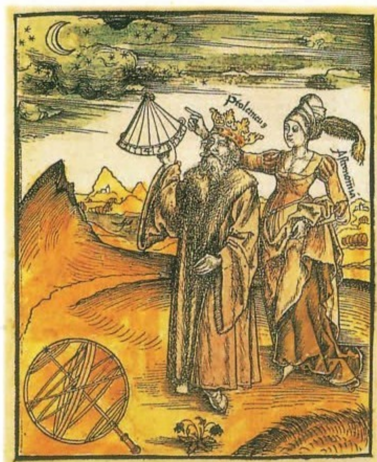


图1.2　托勒密用象限仪测量月亮的高度。巴塞尔，1508年。

亚里士多德认为地球是不动的，太阳、月亮、行星和恒星都以圆周为轨道围绕着地球公转。他相信这些，是因为他认为地球是宇宙的中心，而圆周运动是最完美的；他的这种看法是基于某些神秘的原因。公元2世纪，这个思想被托勒密精制成一个完整的宇宙学模型。地球处于正中心，8个天球包围着它，这8个天球分别负载着月亮、太阳、恒星和5个当时已知的行星：水星、金星、火星、木星和土星（图1.2）。为了说明在天空中观察到的这些行星的相当复杂的轨道，人们认为它们本身沿着附在相应天球上的更小的圆周运动。最外层的天球携带着所谓的固定恒星，它们的相对位置总是保持不变，但是总体围绕着天空旋转。最后一层天球之外为何物一直不很清楚，但是它肯定不是人类所能观测到的宇宙部分。

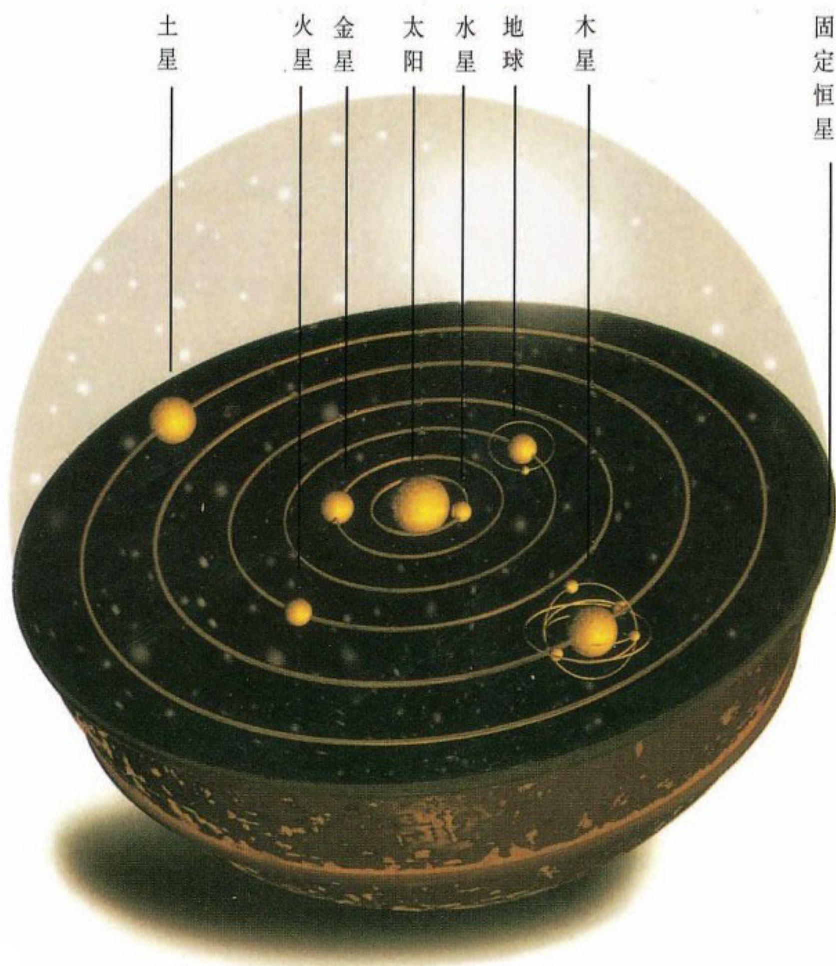


图1.3

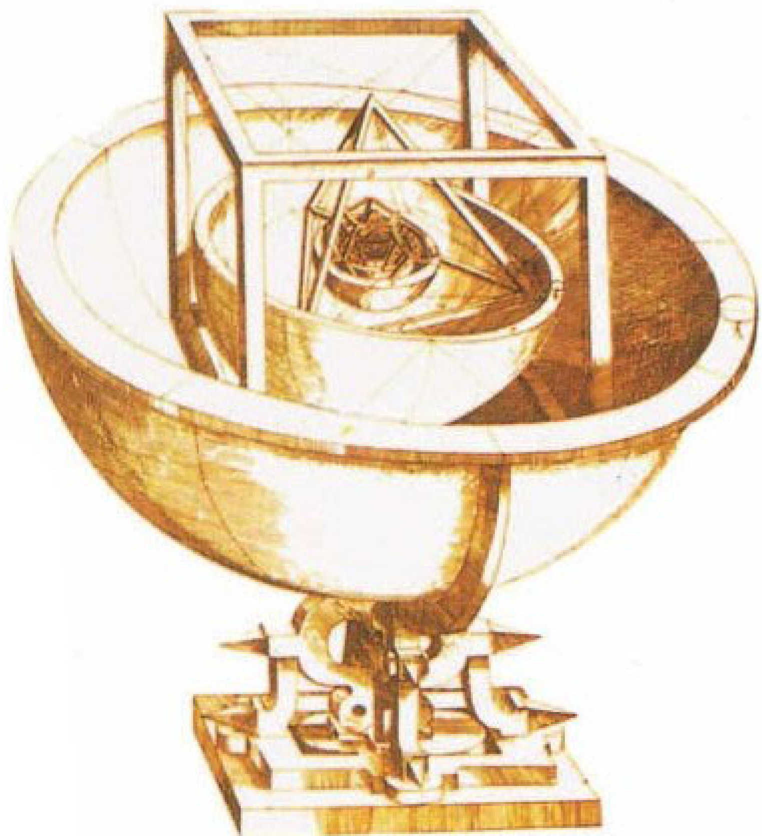


尼古拉·哥白尼（1473～1543）。

托勒密模型的系统可以相当精密地预言天体在天空中的位置。但是为了正确地预言这些位置，托勒密不得不假定，月亮遵循的轨道有时使它离地球的距离是其他时候的一半。这意味着月亮有时显得要比其他时候大1倍！托勒密承认这个瑕疵，但是尽管如此，他的模型被广泛地，虽然不是普适地接受。它被基督教会接纳为与《圣经》相一致的宇宙图象。这是因为它具有巨大优势，即在固定恒星天球之外为天堂和地狱留下了大量的空间。

然而，1514年波兰教士尼古拉·哥白尼提出了一个更简单的模型。（起初，也许哥白尼害怕被教会谴责为异端，所以将他的模型匿名地流传。）他的观念是，太阳静止地位于中心，而地球和行星们围绕着太阳做圆周运动（图1.3）。将近一个世纪以后，人们才认真接受他的观念。

后来，两位天文学家——德国人约翰斯·开普勒和意大利人伽利略·伽利雷开始公开支持哥白尼理论，尽管它所预言的轨道还不能完全与观测相符合。直到1609年，亚里士多德和托勒密的理论才宣告死亡。那一年，伽利略用刚发明的望远镜来观测夜空。当他观测木星时，发现有几个小卫星或月亮围绕着它转动，这表明不像亚里士多德和托勒密设想的那样，并非所有东西都必须直接地围绕着地球转动（当然，仍然可能相信地球是静止地处于宇宙的中心，而木星的卫星沿着一种极其复杂的轨道围绕地球运动，表观上看来它们是围绕着木星转动。然而，哥白尼理论却简单得多了）。同时，约翰斯·开普勒修正了哥白尼理论，提出行星不是沿着圆周而是沿着椭圆（椭圆是拉长的圆）运动，从而最终使预言和观察相互一致了。



开普勒的理论模型把行星轨道和同心几何立体的配置相联系。

就开普勒而言，椭圆轨道仅仅是想当然的，并且是相当讨厌的假设，因为椭圆显然不如正圆那么完美。虽然他几乎偶然地发现椭圆轨道

能很好地和观测相符合，但却不能把它和他的磁力引起行星围绕太阳运动的思想相互调和起来。只有到更晚得多的1687年，这一切才得到解释。这一年，艾萨克·牛顿爵士出版了他的《自然哲学的数学原理》，这部也许是物理科学中有史以来最重要的著作。在这部著作中，牛顿不但提出物体如何在空间和时间中运动的理论，并且发展了为分析这些运动所需的复杂的数学。此外，牛顿还提出了万有引力定律。根据这条定律，宇宙中的任一物体都被另外的物体吸引。物体质量越大，相互距离越近，则相互之间的吸引力越大。正是这同一种力，使物体下落到地面。（一个苹果落到牛顿的头上使他得到灵感的故事，几乎肯定是不足凭信的。牛顿自己说过的不过是，当他坐着陷入沉思之时，一个苹果的下落使他得到了万有引力的思想。）牛顿继而证明，根据他的定律，引力使月亮沿着椭圆轨道围绕着地球运行，而地球和其他行星沿着椭圆轨道围绕着太阳公转。



伽利略·伽利雷（1564～1642）。　雕刻，帕多瓦1744年。



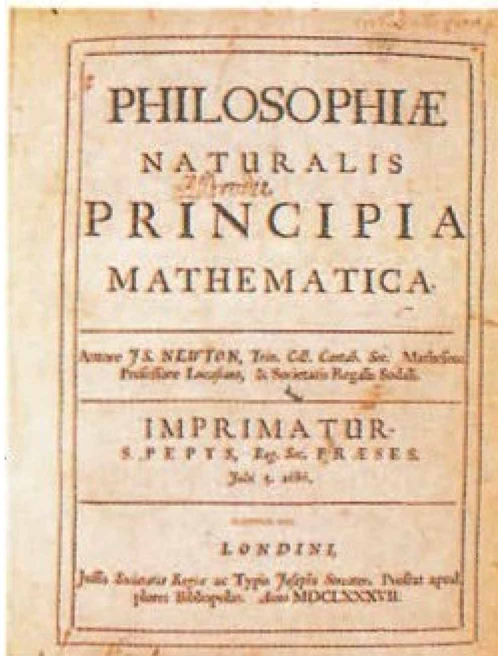
1708年出版的《和谐宇宙》的卷首插图，图中人物为哥白尼、托勒密和伽利略。

哥白尼的模型摆脱了托勒密的天球，以及与其相关的宇宙存在着自然边界的观念。“固定恒星”除了由于地球围绕着自身的轴自转引起的穿越天空的转动外，它们的位置显得固定不变，很自然会使人推测到固定恒星是和我们太阳类似的物体，只是比太阳离开我们远得多了。

按照他的引力理论，牛顿意识到恒星应该相互吸引，这样它们似乎不能保持基本上不动。难道它们不会都一起落到某处去吗？在1691年写给同时代另一位最重要的思想家理查德·本特里的一封信中，牛顿论证道，如果只有有限数目的恒星分布在一个有限的空间区域里，这确实是会发生的。但是另一方面，他推断说，如果存在无限数目的恒星，大体均匀地分布于无限的空间中，对它们而言，因为这时不存在一个中心落点，这种情形就不会发生。



艾萨克·牛顿（1642～1727）。　按照1833年凡德班克的画像雕刻。


PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore JS. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

当人们议论到无限时，这种论证是你会遭遇到的一种陷阱。在一个无限的宇宙中，因为在每一点的两边都有无限颗恒星，所以每一点都可以认为是中心。很久以后才意识到正确的方法，即是先考虑有限的情形，这时所有恒星都相互落到一起，然后加上在这个区域以外大体均匀分布的更多恒星，看事情会如何改变。按照牛顿定律，平均地讲，这额外的恒星对原先的那些根本没有什么影响，所以这些恒星还是同样快地落到一起。我们愿意加上多少恒星就可以加上多少，但是它们仍然总是向自身坍缩。现在我们知道，不可能存在一个无限静态的引力总是吸引的宇宙模型。

在20世纪之前从未有人提出过，宇宙是在膨胀或是在收缩，这有趣地反映了当时的思维风气。一般认为，宇宙要么以一种不变的状态存在了无限长的时间，要么以多多少少正如我们今天观察到的样子在有限久的过去创生。其部分的原因可能是，人们倾向于相信永恒的真理，也可能由于从以下的观念可以得到安慰，即虽然他们会生老病死，但是宇宙必须是不朽的不变的。

甚至那些意识到牛顿的引力理论导致宇宙不可能静止的人，也没有想到提出宇宙可能正在膨胀。相反，他们试图修正理论，使引力在非常大距离下变成排斥的。这并没有太大影响他们对行星运动的预言，然而

却允许恒星的无限分布保持平衡状态——邻近恒星之间的吸引力被远距离外的恒星来的斥力平衡。然而，现在我们相信，这样的平衡是不稳定的：如果某一区域内的恒星稍微相互靠近一些，它们之间的引力就会增强，并超过斥力的作用，因此这些恒星就会继续落到一起。反之，如果某一区域内的恒星稍微相互远离一些，斥力就起主导作用，并驱使它们离得更远。

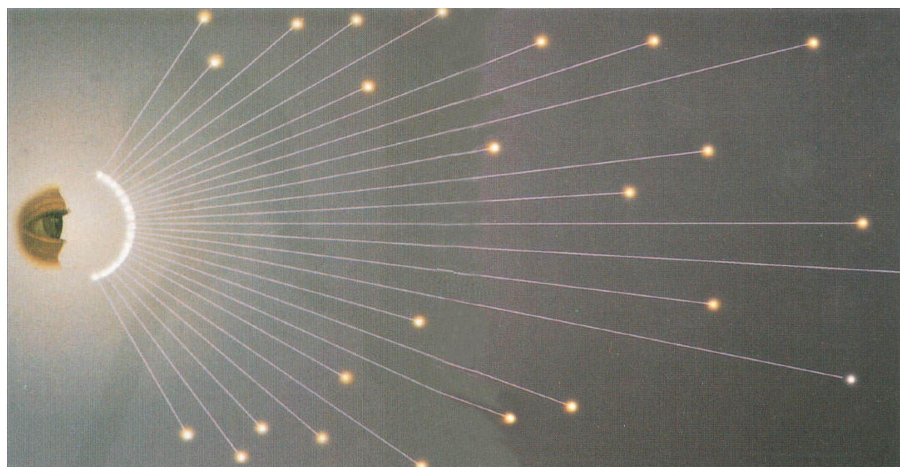


图1.4 如果宇宙是无限而且静止的，则每一道光线都会终结于一个恒星上，使得夜空和太阳一样明亮。

另一个反对无限静止宇宙的异见通常归功于德国哲学家亨利希·奥勃斯，他在1823年撰写了这个理论。事实上，牛顿的一些同时代人已经提出过这个问题，甚至奥勃斯的文章也不是貌似有理地反驳这个模型的第一篇。不管怎么说，这是第一篇被广泛关注的文章。其困难在于，在一个无限静止的宇宙中，几乎每一道视线必须终结于某一颗恒星的表面（图1.4）。这样，人们可以预料，整个天空甚至在夜晚都会像太阳那么明亮。奥勃斯反驳说，远处恒星的光线会被它穿越过的物质吸收而减弱。然而如果真是如此，这介于其间的物质最终会被加热到发出和恒星一样强的光为止。可以避免整个天空像太阳那么明亮的结论的唯一方法是，假定恒星并非永远那么明亮，而是在有限久的过去才开始发光。在这种情况下，吸光物质还没加热，或者远处恒星的光线尚未到达我们这里。这就使我们面临着什么是首次引起恒星发光的问题。



《创业的第二天》　裘里乌斯·希诺·冯·卡罗尔斯菲尔德画于1860年。

当然，宇宙开端的问题比这早很久就被讨论过。根据一些早先的宇宙论和犹太教/基督教/穆斯林传统，宇宙在有限的并非非常遥远的过去的某个时刻启始。对于这样的一个开端，有一种论证是感到必须有“第一推动”来解释宇宙的存在。（在宇宙中，你总可以将一个事件解释为由另一个更早的事件引起的，但是只有当宇宙存在某个开端时，才能用这种方法解释它本身的存在。）圣·奥古斯丁在他的《上帝之城》的著作中提出了另一种论证。他指出，文明在进步，我们将记住创造这些功绩或发展技术的人们。这样，人也许还有宇宙，不可能已经存在了那么长的时间。圣·奥古斯丁根据《创世纪》一书，接受公元前5000年作为宇宙创生的时刻。（有趣的是，这和最近一个冰河时代的结束，大约公元前10000年相距不远。考古学家告诉我们，文明实际上正是从那时开始的。）

另一方面，亚里士多德和其他大多数希腊哲学家不喜欢创生的思想，因为它带有太多的神学干涉的味道，所以他们相信，人类及其周围的世界已经并将继续永远存在。古人已经考虑到上述文明进步的论点，

用周期性洪水或其他灾难的出现，使人类重复地回到文明的开初，来回答上面的诘难。

1781年，哲学家伊曼努尔·康德发表了里程碑般的（也是非常晦涩难懂的）著作《纯粹理性批判》。在这本书中，他深入地考察了关于宇宙在时间上是否有开端、在空间上是否有限的问题。他称这些问题为纯粹理性的二律背反（也就是矛盾）。因为他感到存在同样令人信服的论据，来证明宇宙有开端的正命题，以及宇宙已经存在无限久的反命题。他对正命题的论证是：如果宇宙没有一个开端，则任何事件之前必有无限的时间。他认为这是荒谬的。他对反命题的论证是：如果宇宙有一开端，在它之前必有无限的时间，为何宇宙必须在某一特定的时刻开始呢？事实上，他对正命题和反命题用同样的论证来辩护。它们都是基于他隐含的假设，即不管宇宙是否存在了无限久。时间均可无限地倒溯回去。我们将会看到，在宇宙开端之前时间概念是没有意义的。这一点是圣·奥古斯丁首先指出的。当他被问及："上帝在他创造宇宙之前做什么？"奥古斯丁并没有这样回答："他正为诘问这类问题的人准备地狱。"而是说时间是上帝创造的宇宙的一个性质，在宇宙开端之前不存在。

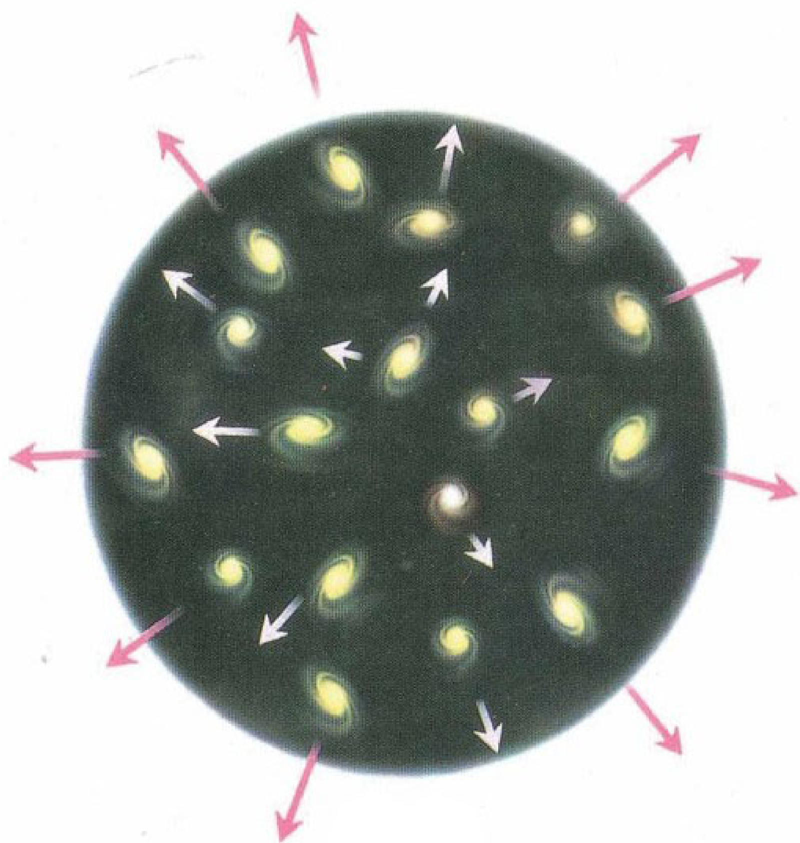


图1.5

当大部分人深信一个本质上静止不变的宇宙时，关于它有无开端的问题，实在是一个形而上学或神学的问题。按照宇宙存在无限久的理论，或者按照宇宙以它似乎已经存在了无限久的样子在某一个有限时刻起始的理论，我们可以同样好地解释所观察到的事实。但在1929年，埃德温·哈勃作出了一个里程碑式的观测，即不管你往哪个方向观测，远处的星系都正急速地飞离我们而去。换言之，宇宙正在膨胀（图1.5）。这意味着，在早先的时刻星体更加相互靠近。事实上，似乎在大约100亿至200亿年之前的某一时刻，它们刚好在同一地方，所以那时候宇宙的密度为无限大。这个发现最终将宇宙开端的问题带进了科学的王国。

哈勃的观测暗示存在一个叫做大爆炸的时刻，当时宇宙的尺度无限小，而且无限紧密。在这种条件下，所有科学定律并因此所有预见将来的能力都崩溃了。如果在这个时刻之前有过一些事件，它们将不可能影响现在发生的东西。因为它们没有任何观测的后果，所以可不理睬其存

在。由于更早的时间根本没有定义，所以在这个意义上，人们可以说，时间在大爆炸时有一开端。必须强调的是，这个时间的开端和早先考虑的非常不同。在一个不变的宇宙中，时间的端点是必须由宇宙之外的存在物赋予的某种东西；宇宙的开端并没有物理的必然性。人们可以想象上帝在过去从字面上说的任何时刻创生了宇宙，如果宇宙正在膨胀，那么何以宇宙有一个开端似乎就有了物理的原因。人们仍然可以想象，上帝是在大爆炸的瞬间创生宇宙，或者甚至在更晚的时刻，以使它看起来就像发生过大爆炸似的方式创生，但是设想在大爆炸之前创生宇宙是没有意义的。大爆炸宇宙并没有排斥造物主，只不过对他何时从事这工作加上限制而已！



埃德温·哈勃（1889～1953）在1924年拍摄于威尔逊山天文台

为了谈论宇宙的性质和讨论诸如它是否存在启始或终结的问题，你必须清楚什么是科学理论。我将采用素朴的观点，即理论只不过是宇宙或它的受限制的部分的模型，以及一族把这模型中的量和我们做的观测相联系的规则。它只存在于我们的头脑中，不再具有任何其他（不管在任何意义上）的实在性。一个好的理论必须满足以下两个要求：首先，这个理论必须能准确地描述大量的观测——这些观测是根据只包含少数任选的元素的模型所做出的；其次，这个理论能对未来观测的结果作出明确的预言。例如，亚里士多德相信恩贝多克利的关于任何东西是由四元素——土、气、火和水组成的理论，该理论是足够简单的了，但它没有做出任何明确的预言。另一方面，牛顿的引力理论是基于甚至更为简单的模型，在此模型中两物体用一种力相互吸引，该力和被称为它们质量的量成正比，并和它们之间的距离的平方成反比。然而，它以很高的精确性预言了太阳、月亮和行星的运动。



在射手座可以见到银河系的中心

在只是一个假设的意义上来讲，任何物理理论总是临时性的：你永远不可能证明它。不管多少回实验的结果和某个理论相一致，你永远不可能断定下一次结果不和它矛盾。另一方面，哪怕你只要找到一个和理论预言不一致的观测事实，即可证伪之。正如科学哲学家卡尔·波普强调的，一个好的理论的特征是，它能给出许多在原则上可以被观测否定或证伪的预言。每回观察到与这预言相符的新的实验，则这理论就存活，并且增加了我们对它的信任度；然而若有一个新的观测与之不符，则我们只得抛弃或修正这理论。

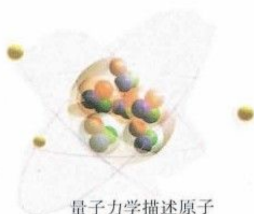
这被认为是迟早总会发生的事，但是你总可以质疑实现该观测的人员的能力。

在现实中经常发生的是，设计出的新理论实际上是原先理论的一个

扩展。例如，非常精确地观测水星，发现它的运动和牛顿引力理论预言之间有一个微小的差异。爱因斯坦的广义相对论预言了和牛顿理论略微不同的运动。爱因斯坦的预言和观测到的相符合，而牛顿理论做不到，这个事实是对这个新理论的一个关键的证实。然而在我们正常处理的情形下，牛顿理论和广义相对论的预言之间差异非常小，所以为了所有实用的目的，我们仍然使用牛顿理论。（牛顿理论还有一个巨大的优点，用它计算比用爱因斯坦理论简单多了！）

科学的终极目的是提供描述整个宇宙的单一理论。然而，大多数科学家遵循的方法是把问题分成两部分。首先，存在一些定律，这些定律告诉我们宇宙如何随时间变化。（如果我们知道在任一时刻宇宙是什么样子的，这些定律就告诉我们它在未来任何时刻是什么样子的。）第二，存在宇宙初始状态的问题。有些人觉得科学只应关心第一部分，他们将初始状态的问题看做玄学或宗教的事体。他们会说，无所不能的上帝可以随心所欲地启始宇宙。那也许是真的，但是，倘若那样，他也可以使宇宙以完全任意的方式演化，可是，似乎他选择使宇宙以一种非常规则的，按照一定规律的方式演化。所以，看来可以同样合理地假定，也存在着制约初始状态的定律。

一蹴而就地设计一种能描述整个宇宙的理论，看来是非常困难的。相反，我们将这个问题分成许多小块，并发明许多部分理论（图1.6）。每一部分理论描述和预言一定有限范围的观测，同时忽略其他量的效应或用简单的一组数来代表。这方法可能全错。如果宇宙中的每一件东西都以非常基本的方式依赖于其他的任何一件东西，用隔离法研究问题的部分也许不可能逼近其完全的答案。尽管如此，这肯定是我们在过去取得进展的方法。牛顿引力理论又是一个经典的例子，它告诉我们两个物体之间的引力只取决于与每个物体相关的一个数——-它的质量，而与物体由何物组成无关。这样，人们不需要太阳和行星结构和成分的理论就可以计算它们的轨道。



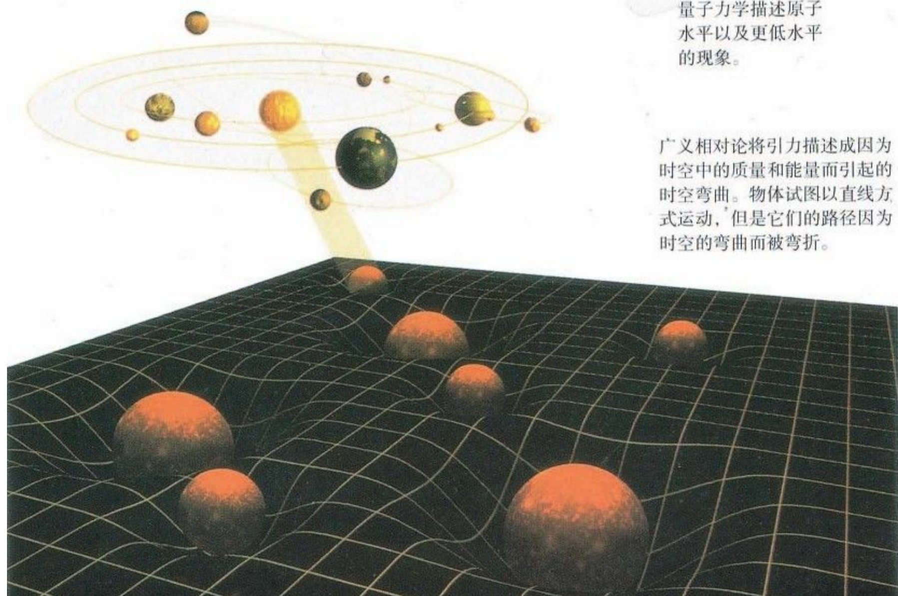
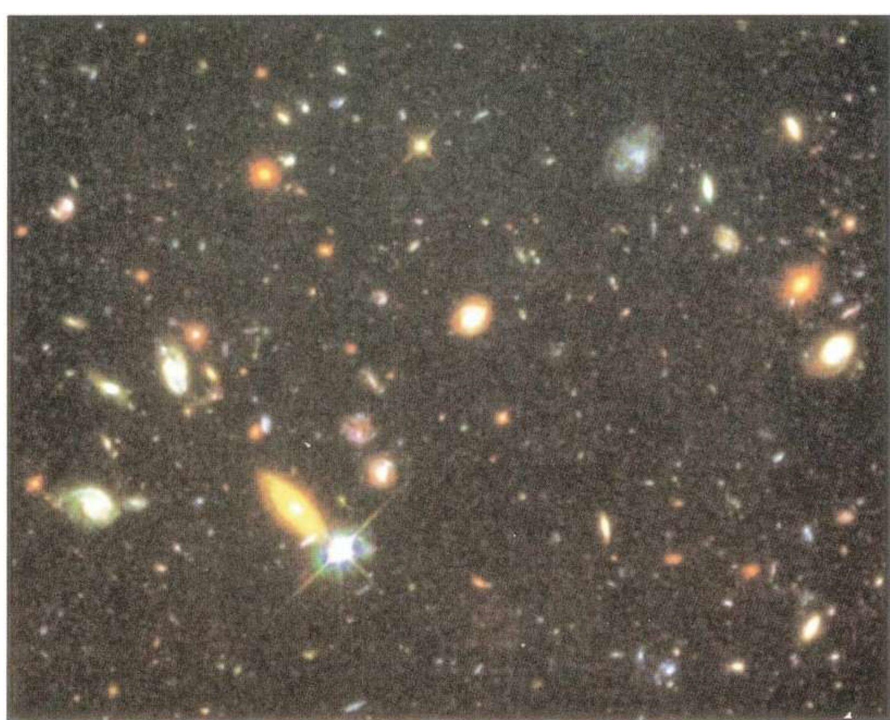


图1.6

今天，科学家按照两个基本的部分理论——广义相对论和量子力学来描述宇宙。它们是本世纪（即20世纪，下同一编者注）上半叶的伟大的智慧成就。广义相对论描述引力和宇宙的大尺度结构，也就是从只有几英里直到大至1亿亿亿（1后面跟24个0）英里（1英里＝1.609千米），即可观测到的宇宙的尺度的结构。另一方面，量子力学处理极小尺度，例如万亿分之1英寸（1英寸＝2.54厘米）的现象。然而可惜的是，这两个理论不是相互协调的——它们不可能都对。当代物理学的一个主要的努力，以及本书的主题，即是寻求一个能将其合并在一起的新理论——量子引力论。我们还没有这样的理论，要获得这个理论，我们可能还有相当长的路要走，然而我们已经知道了这个理论所应具备的许多性质。在以下几章，人们将会看到，我们对量子引力论所应有的预言已经知道得相当多。

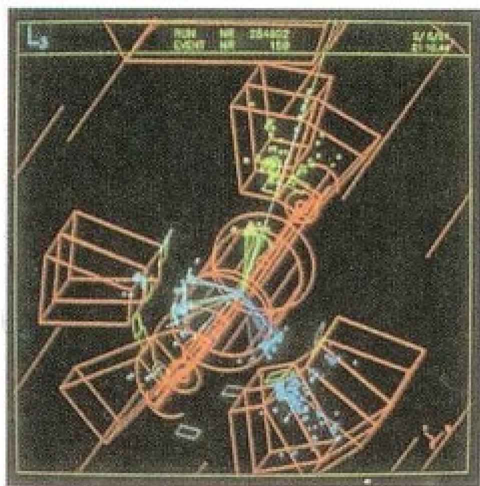


宏观宇宙美国航天局哈勃空间望远镜拍摄的哈勃深场图（HDF），在这张“最深”的图中可以看到几百个星系。

现在，如果你相信宇宙不是任意的，而是被明确的定律制约的，你最终必须将这些部分理论合并成一个能描述宇宙中万物的完整统一理论。然而，在寻求这样的完整统一理论中有一个基本的矛盾。在前面概括的关于科学理论的思想中，假定我们是理性的生物，既可以随心所欲地观测宇宙，又可以从观察中得出逻辑推论。在这样的方案里可以合理地假设，我们可以越来越接近制约我们宇宙的定律。然而，如果真有一个完整的统一理论，则它大概也将决定我们的行动。这样，理论本身就决定了我们对之探索的结果！那么为什么它保证我们从证据得到正确的结论？难道它不也可以同样地保证我们引出错误的结论吗？或者根本没有结论？

对于这个问题，我所能给出的回答是基于达尔文的自然选择原理。该思想说，在任何自繁殖的群体中，总是存在着不同个体在遗传物质和发育上的变异。这些差异表明，某些个体比其他个体对它们周围的世界更能引出正确的结论，并去适应它。这些个体更可能存活、繁殖，因此它们的行为和思维的模式将越来越起主导作用。以下这一点在过去肯定是真的，即我们称之为智慧和科学发现的东西给我们带来了存活的好

处。这种情况是否仍会如此没有这么清楚：我们的科学发现可以轻易地毁灭我们的一切。即使不是这样，一个完整的统一理论对于我们存活的机会不会有很大影响。然而，假定宇宙已经以规则的方式演化至今，我们可以预期，自然选择赋予我们的推理能力在探索完整统一理论时仍然有效，并因此不会导致我们得到错误的结论。



微观宇宙。在欧洲核子研究中心CERN 1.3探测器屏幕上看到的，计算机生成的，在粒子水平上的，一个事件的图象。

因为，除了最极端的情况外，我们已有的部分理论足以对所有的一切作出精确的预言，所以，要为探索宇宙的终极理论寻找实用的理由，看来就非常困难了：（值得指出的是，虽然类似的论点在过去既可以用来反对相对论，又可以用来反对量子力学，但这些理论已给我们带来了核能和微电子学的革命！）所以，发现一个完整的统一理论可能对我们种族的存活无助，甚至也不会影响我们的生活方式。然而自从文明开始以来，人们即不甘心于将事件看做互不相关不可理解。他们渴望理解世界的根本秩序。今天我们仍然亟想知道，我们为何在此？我们从何而来？人类求知的最深切的意愿足以为我们从事的不断探索提供充足的理由。而我们的目标恰恰正是对于我们生存其中的宇宙作出完整的描述。

第二章　空间和时间

我们现在关于物体运动的观念来自于伽利略和牛顿。在他们之前，人们相信亚里士多德，他说物体的自然状态是静止的，并且只有在受到力或冲击的推动时才运动。这样，重的物体比轻的物体下落得更快，因为它受到更大的将其拉向地球的力。

亚里士多德的传统观点还以为，人们依靠纯粹思维即可以找出所有制约宇宙的定律：不必要用观测去检验之。这样，在伽利略之前，没有一个人想看看不同重量的物体是否确实以不同速度下落。据说，伽利略从比萨斜塔上将重物落下，从而证明了亚里士多德的信念是错的。这故事几乎不足以信，但是伽利略的确做了一些等效的事：让不同重量的球沿光滑的斜面上滚下（图2.1）。这种情况类似于重物的垂直下落（图2.2），只是因为速度小而更容易观察而已。伽利略的测量指出，不管物体的重量多少，其速度增加的速率是一样的。例如，你在一个沿水平方向每走10米即下降1米的斜面上释放1个球，则1秒钟后球的速度为每秒1米，2秒钟后为每秒2米，等等，而不管这个球多重。当然，一个铅锤比一片羽毛下落得更快些，那只是因为空气阻力将羽毛的速度降低。如果一个人释放两个不受任何空气阻力的物体，例如两个不同的铅锤，它们则以同样速度下降（图2.2）。在没有空气阻碍东西下落的月球上，航天员大卫·斯各特进行了羽毛和铅锤实验，并且发现两者确实同时落到月面上（图2.3）。



图2.1



图2.2



伽利略·伽利雷（1564-1642），帕西格纳尼雕刻。虽然伽利略在比萨斜塔做的实验也许从未发生过，但是，他第一手观察的原则，改变了科学的历史。

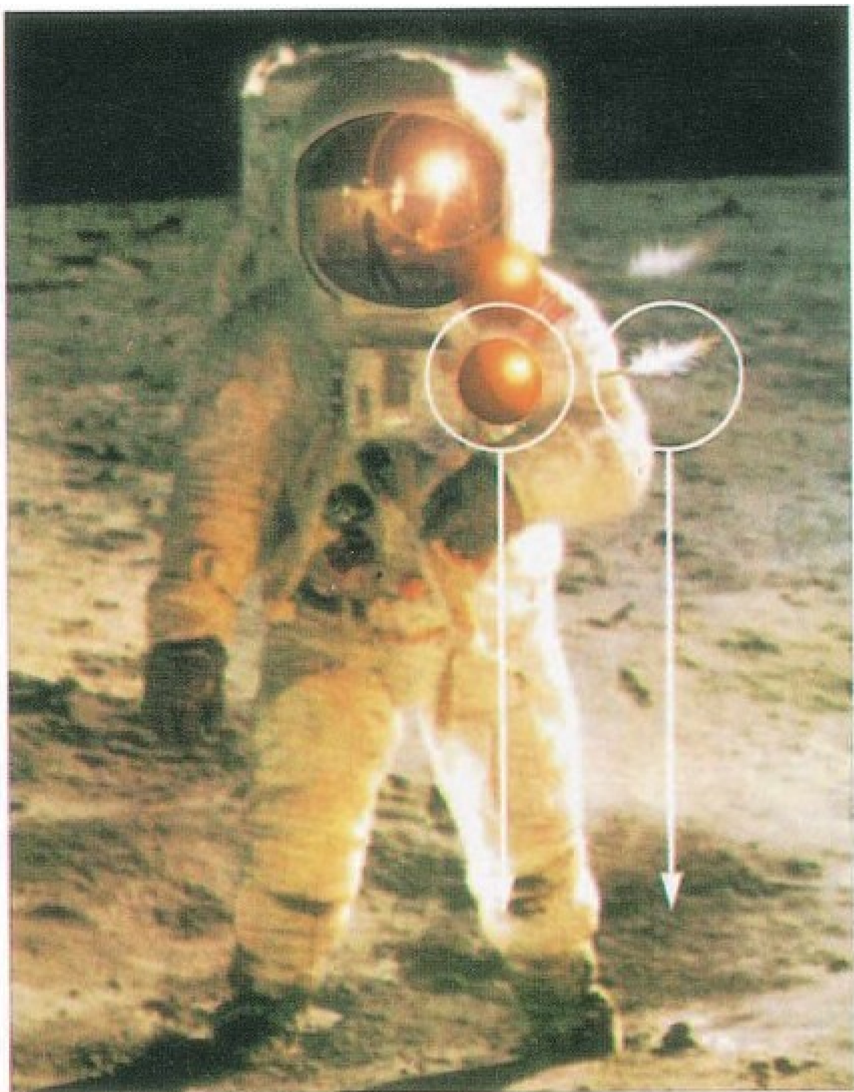


图2.3　在月亮上不存在空气阻力，一根羽毛和一个铅球以同样速度下降。

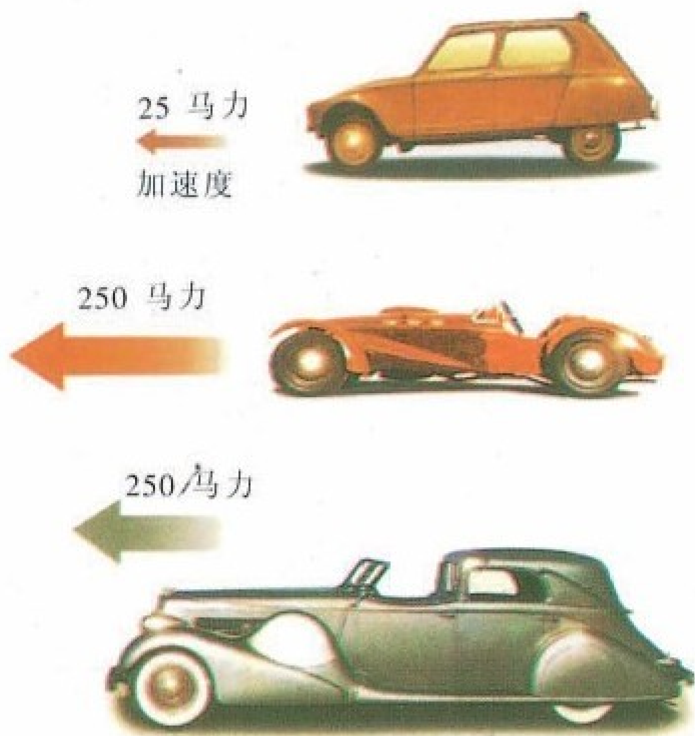


图2.4　物体的加速度越大，则加在上面的力就越大。但是，加速度越小则被加速的物体的质量就越大。

牛顿把伽利略的测量当做他的运动定律的基础。在伽利略的实验中，当物体从斜坡上滚下时，它一直受到不变外力（它的重量）的作用，其效应是使它恒定地加速。这表明，力的真正效应总是改变物体的速度，而不是像原先想象的那样，仅仅使之运动。同时，它还意味着，只要物体没有受到外力，它就会以同样的速度保持直线运动。这个思想首次在牛顿于1687年出版的《数学原理》（即《自然哲学的数学原理》，下同——编者注）一书中明白地陈述出来了，并被称为牛顿第一定律。牛顿第二定律给出物体在受力时发生的现象：物体在被加速或改变其速度时，其改变率与所受的外力成比例。（例如，如果力加倍，则加速度也将加倍。）物体的质量（或物质的量）越大，则加速度越小（以同样的力作用于具有两倍质量的物体时只产生一半的加速度。[小汽车可提供一个熟知的例子，发动机的功率越大，则加速度越大，但是小汽车越重，对于同样的发动机，则加速度越小（图2.4）。除了他的运动定律，牛顿还发现了描述引力的定律：任何两个物体都相互吸引，其引力大小与每个物体的质量成比例。于是，如果其中一个物体（例如A）

的质量加倍，则两个物体之间的引力加倍。这是你能预料得到的，因为新的物体A可看成两个具有原先质量的物体，每一个用原先的力来吸引物体B，所以A和B之间的总力加倍。而如果，比如说，其中一个物体质量大到原先的2倍，另一物体大到3倍，则引力就大到6倍。现在人们可以看到，为何落体总以同样的速率下降：具有两倍重量的物体受到将其向下拉的两倍的引力，但它的质量也大到两倍。按照牛顿第二定律，这两个效应刚好相互抵消，所以在所有情形下加速度都是相同的。

牛顿引力定律还告诉我们，物体之间的距离越远，则引力越小。牛顿引力定律讲，一个恒星的引力只是一个类似恒星在距离小一半时的引力的四分之一。这个定律极其精确地预言了地球、月亮和其他行星的轨道。如果这定律中恒星的万有引力随距离减小或者增大得快一些，则行星轨道不再是椭圆的了，它们就会以螺旋线的形状要么盘旋到太阳上去，要么从太阳逃逸（图2.5）。

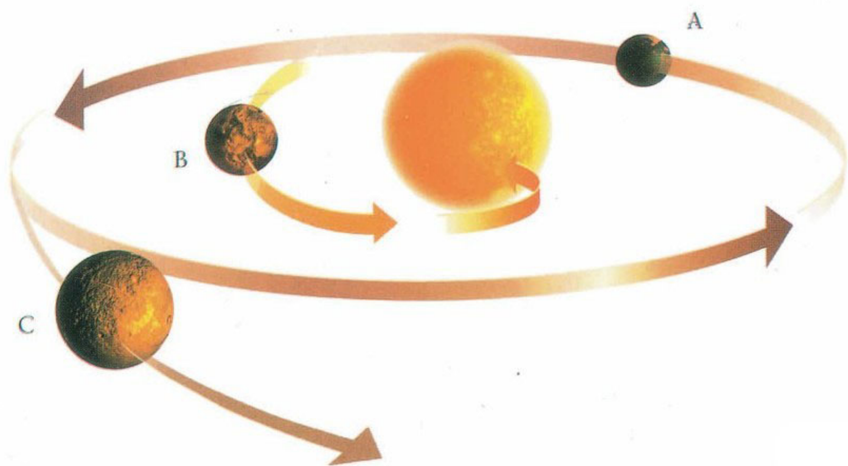


图2.5　如果引力更弱，或者比牛顿理论所预言的随距离减小得更迅速，围绕着太阳公转的行星轨道就不会是稳定的椭圆（A）。它们或者会飞离太阳（C），或者会沿着螺旋形轨道撞到太阳上去（B）。

亚里士多德和伽利略-牛顿观念的巨大差别在于，亚里士多德相信一个优越的静止状态，任何没有受到外力和冲击的物体都取这种状态。特别是他以为地球是静止的但是从牛顿定律可以推断，并不存在唯一的静止标准。人们可以讲，物体A静止而物体B以不变的速度相对于物体A运动，或物体B静止而物体A运动，这两种讲法是等价的。例如，我们暂时不理睬地球的自转和它围绕太阳的公转，则可以讲地球是静止的，一辆

有轨电车以每小时30英里的速度向东运动，或有轨电车是静止的，而地球以每小时30英里的速度向西运动（图2.7）。如果一个人在有轨电车上做运动物体的实验，所有牛顿定律仍然都成立。例如，在有轨电车上打乒乓球，人们将会发现，正如在铁轨旁一张台桌上的球一样，乒乓球服从牛顿定律，所以无法得知究竟是火车还是地球在运动。

缺乏静止的绝对标准意味着，人们不能确定，在不同时间发生的两个事件是否发生在空间的相同位置上。例如，假定在有轨电车上我们的乒乓球直上直下地弹跳，在一秒钟前后两次撞到桌面上的同一处（图2.6）。在铁轨上的人来看，这两次弹跳似乎发生在大约相距13米的不同的位置上，因为在这两回弹跳的时间间隔里，有轨电车已在铁轨上走了这么远。

这样，不存在绝对静止意味着不能像亚里士多德相信的那样，给事件指定一个绝对的空间位置。事件的位置以及它们之间的距离对于在有轨电车上和铁轨上的人来讲是不同的，所以没有理由以为一个人的立场比别人的更优越。

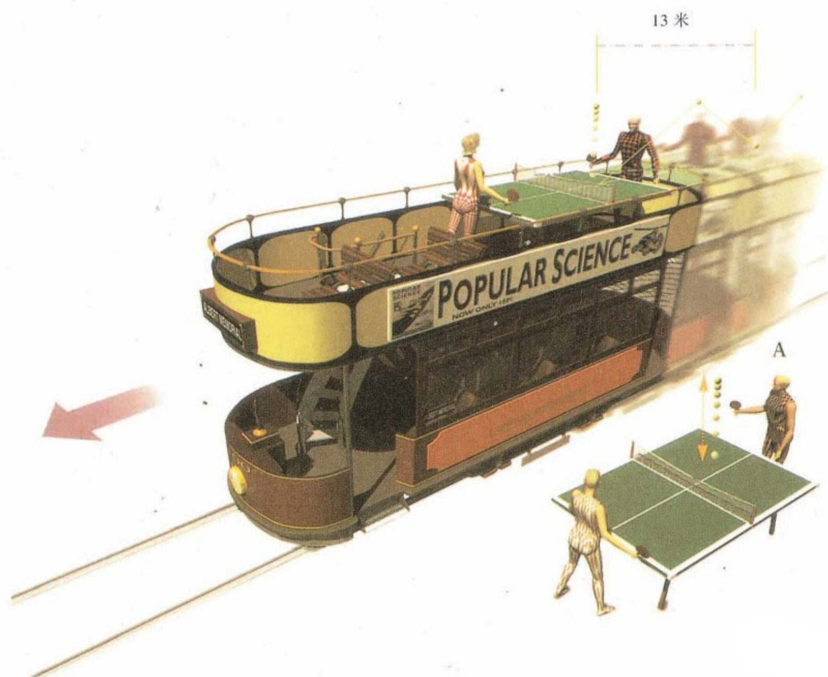


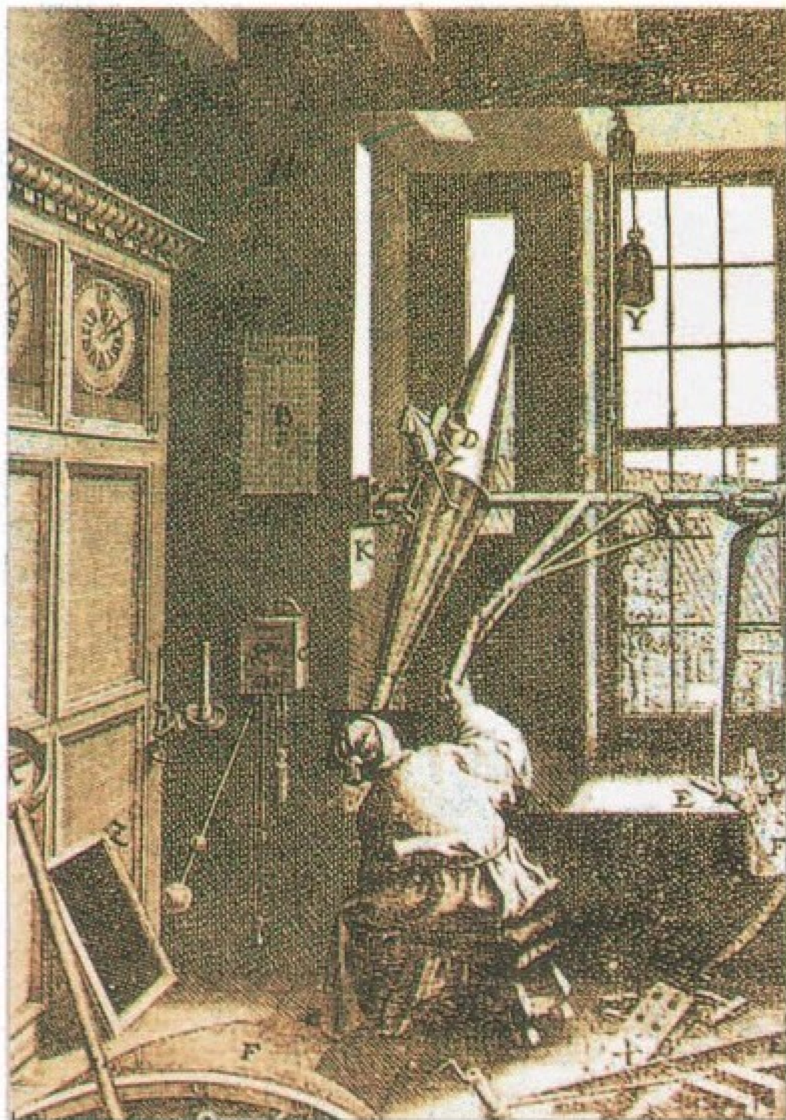
图2.6　一辆以每小时30英里运行的电车通过不动的乒乓球手（A）。从（A）的观点看，电车上的球在隔开大约13米的两点间反弹。对于电车上的乒乓球手而言，显得是在同一点弹跳，正如从（A）的观点看由（A）自己反弹的球一样：然而在行星地球上的（A）也穿过空间运动，则

对于太阳系中的一位观察者而言，球在两次反弹之间显得运动了大约3万米。



图2.7 如果（B）在以每小时5英里速度向南运行的电车上往北以每小时5英里速度向北行走，则对于地面上的观察者（A）而言显得是静止的。然而，如果他以同样的速度在电车上向北行走（C），则对于同一观察者而言则显得是以每小时10英里的速度运动。

牛顿对不存在绝对位置或所谓绝对空间非常忧虑，因为这和他的绝对上帝的观念不一致。事实上，即使他的定律隐含着绝对空间的不存在，他也拒绝接受。因为这个非理性的信仰，他受到许多人的严厉批评，其中最有名的是贝克莱主教，他是一个相信所有的物质实体、空间和时间都是虚妄的哲学家，当人们将贝克莱的见解告诉著名的约翰逊博士时，他用脚趾踢到一块大石头上，并大叫道：“我要这样驳斥它！”



欧尔·罗默在他哥本哈根家中的中星仪。选自《天文学基础》的雕刻画1735年

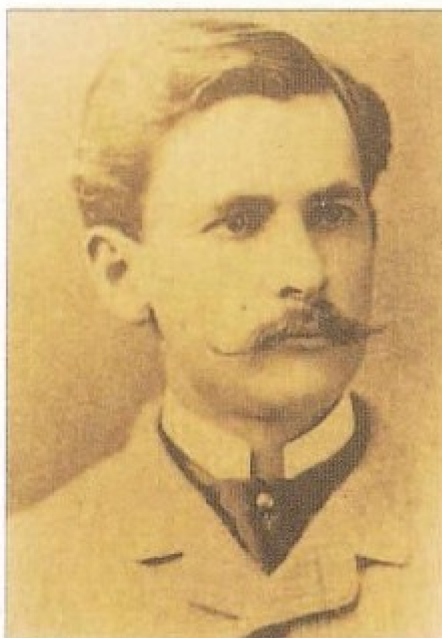
亚里士多德和牛顿都相信绝对时间。也就是说，他们相信人们可以毫不含糊地测量两个事件之间的时间间隔，只要用好的钟，不管谁去测量，这个时间都是一样的。时间相对于空间是完全分离并且独立的。这就是大部分人当做常识的观点。然而，我们必须改变这种关于空间和时间的观念，虽然这种显而易见的常识可以很好地对付运动甚慢的诸如苹果、行星的问题，但在处理以光速或接近光速运动的物体时却根本无效。

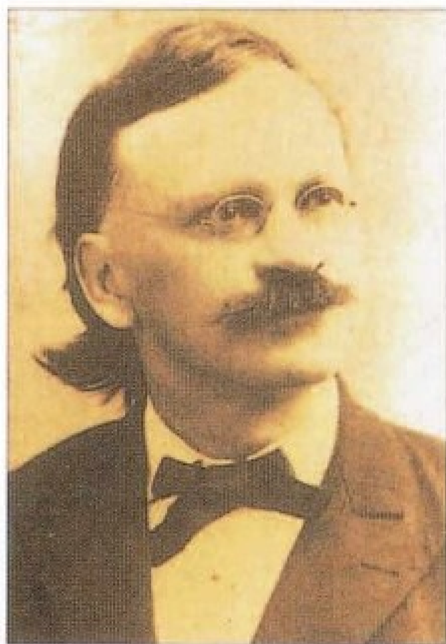
1676年，丹麦的天文学家欧尔·克里斯琴森·罗默第一次发现了光以有限但非常高的速度旅行的事实，他观察到，木星的卫星不是以等时间间隔从木星背后出来，不像如果卫星以不变速度围绕木星运动时，人们所预料的那样。当地球和木星都围绕着太阳公转时，它们之间的距离在变化着：罗默注意到，我们离木星越远则木星的月食出现得越晚：他论证道，因为当我们离开更远时，光从木星卫星那里要花更长的时间才能达到我们这里。然而，他测得的木星到地球的距离变化不是非常准确，与现在的每秒186000英里的值相比较，那么他的光速的数值为每秒140000英里。尽管如此，罗默不仅证明了光以有限速度行进，并且测量了那个速度，他的成就是卓越的——要知道，这一切都是在牛顿发表《数学原理》之前11年做出的。



詹姆士·克拉克·麦克斯韦（1831-1879年）

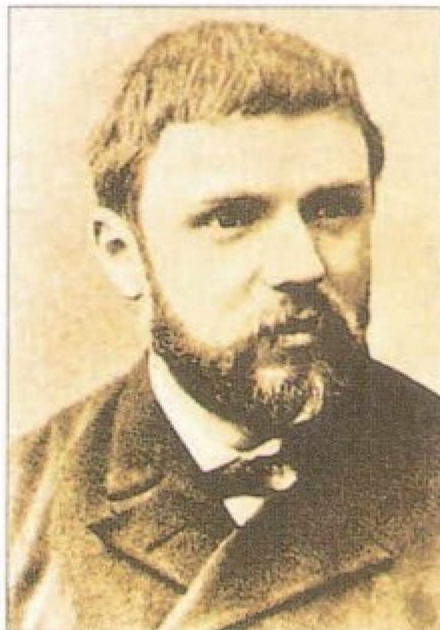
直到1865年，当英国的物理学家詹姆士·克拉克·麦克斯韦成功地将直到当时用以描述电力和磁力的部分理论统一起来以后，才有了光传播的正确理论。麦克斯韦方程预言，在合并的电磁场中可以存在波动的微扰，它们以固定的速度，正如池塘水面上的涟漪那样行进。如果这些波的波长（两个相邻波峰之间的距离）为1米或更长一些，它们就是我们所谓的射电波。更短波长的波称做微波（几厘米）或红外线（长于万分之一厘米）。可见光的波长在一百万分之四十至一百万分之八十厘米之间。更短的波长被称为紫外线、X射线和伽马射线。


阿尔伯特·阿伯拉罕·迈克耳孙（1852～1931）。

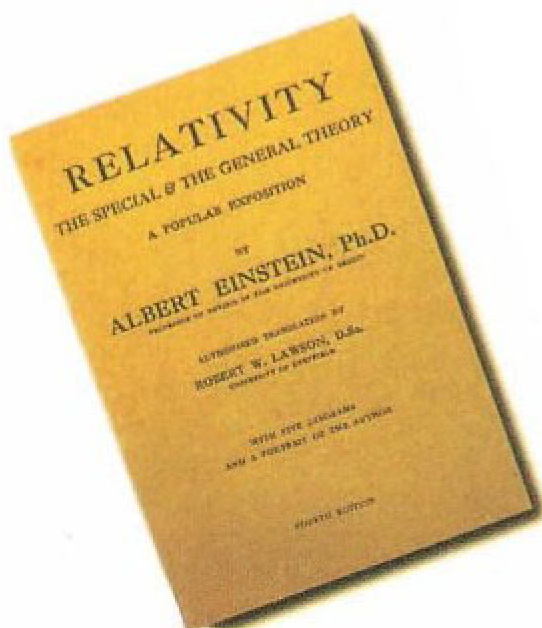


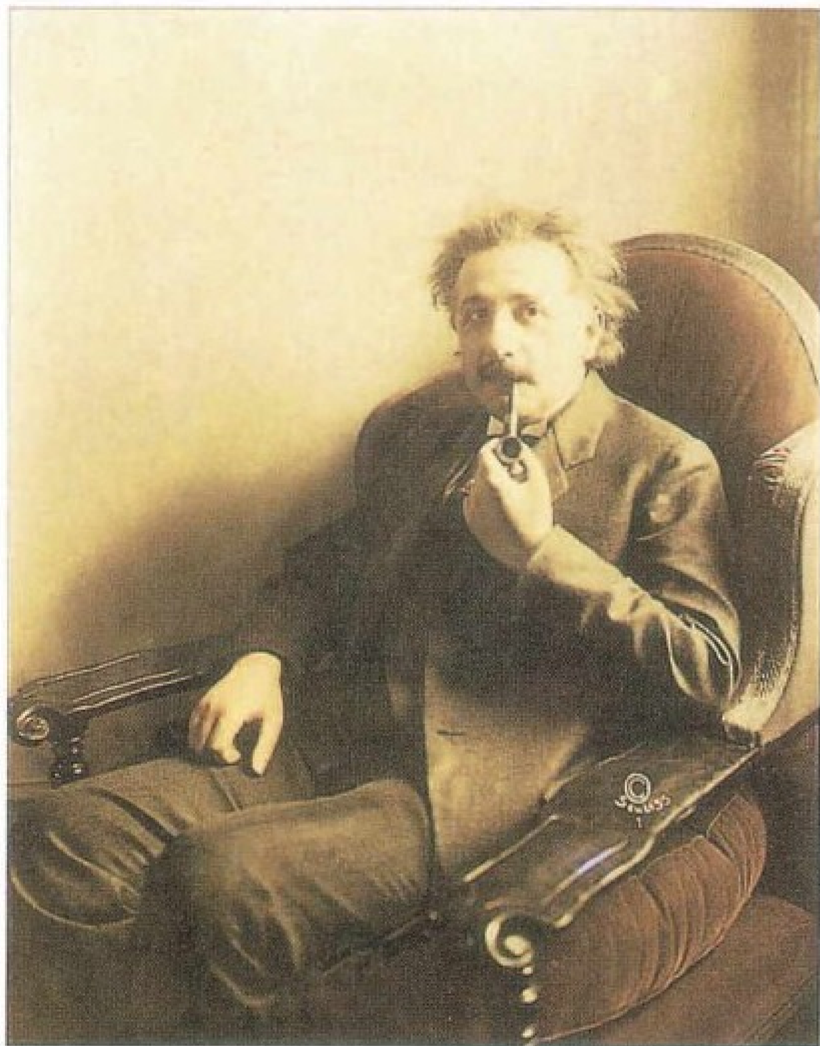
爱德华·莫雷（1838-1923）

麦克斯韦理论预言，射电波或光波应以某一固定的速度行进。但是牛顿理论已经摆脱了绝对静止的观念，所以如果假定光以固定的速度旅行，人们就必须说清这固定的速度是相对于何物来测量的。因此有人提出，存在着一种无所不在的称为“以太”的物质，甚至在“真空的”空间中也是如此。正如声波在空气中旅行一样，光波应该通过以太行进，所以它们的速度应是相对于以太而言的。相对于以太运动的不同观察者，会看到光以不同的速度冲他们而来，但是光对以太的速度保持不变。特别是当地球在它围绕太阳的轨道穿过以太时，在地球通过以太运动的方向测量的光速（当我们对光源运动时）应该大于在与运动垂直方向测量的光速（当我们不对光源运动时），1887年，阿尔伯特·迈克耳孙（他后来成为美国第一位诺贝尔物理学奖获得者）和爱德华·莫雷在克里夫兰的凯思应用科学学校进行了一个非常仔细的实验。他们将沿地球运动方向以及垂直于此方向的光速进行比较，使他们大为惊奇的是，他们发现这两个光速完全一样！



朱尔斯·亨利·庞加莱（1854～1912）





阿尔伯特·爱因斯坦（1879-1953），德国1920年。

在1887年至1905年之间，依据相对于以太运动的物体收缩和时钟变慢的机制，出现过好几个解释迈克耳孙-莫雷实验的尝试，最著名者为荷兰物理学家亨得利克·洛伦兹做出的。然而，一位迄至当时还默默无闻的瑞士专利局的职员阿尔伯特·爱因斯坦，在1905年的一篇著名的论文中指出，只要人们愿意抛弃绝对时间观念的话，整个以太的观念则是多余的。几个星期之后，法国第一流的数学家亨利·庞加莱也提出类似的观点。爱因斯坦的论证比庞加莱的论证更接近物理，后者将其考虑为数学问题。通常将这个新理论归功于爱因斯坦，但人们不会忘记，庞加莱的名字在其中起了重要的作用。

这个被称为相对论的基本假设是，不管观察者以任何速度做自由运动，相对于他们而言，科学定律都应该是一样的。这对于牛顿的运动定律当然是对的，但是现在这个观念被扩展到包括麦克斯韦理论和光速：不管观察者运动多快，他们应测量到一样的光速。这简单的观念有一些非凡的结论。可能最著名者莫过于质量和能量的等价，这可用爱因斯坦著名的方程$E=mc^2$来表达（E是能量，m是质量，c是光速），以及没有任何东西可能行进得比光还快的定律。由于能量和质量的等价，物体由于它的运动具有的能量应该加到它的质量上去。换言之，要加速它将更为困难。这个效应只有当物体以接近于光速的速度运动时才有实际的意义。例如，以10%光速运动的物体的质量只比原先增加了0.5%，而以90%光速运动的物体，其质量变得比正常质量的两倍还多。当一个物体接近光速时，它的质量上升得越来越快，这样它需要越来越多的能量才能进一步加速上去。实际上它永远不可能达到光速，因为那时质量会变成无限大，而根据质量能量等价原理，这就需要无限大的能量才能做到。由于这个原因，相对论限制了物体运动的速度：任何正常的物体永远以低于光速的速度运动，只有光或其他没有内禀质量的波才能以光速运动。

相对论的一个同等非凡的推论是，它变革了我们空间和时间的观念。在牛顿理论中，如果有一光脉冲从一处发到另一处，（由于时间是绝对的）不同的观测者对这个行程所花的时间不会有异议，但是（因为空间不是绝对的）他们在光行进的距离上不会总取得一致的意见。由于光速正是它行进过的距离除以花费的时间，不同的观察者就测量到不同的光速：另一方面，在相对论中，所有的观察者必须在光以多快速度行进上取得一致意见。然而，在光行进过多远的距离上，他们仍然不能取得一致意见。因此，现在他们在光要花费多少时间上应该不会取得一致意见（花费的时间正是用光速——对这一点所有的观察者都意见一致——去除光行进过的距离——对这一点他们意见不一致）换言之，相对论终结了绝对时间的观念！看来每个观察者都一定有他自己的时间测度，这是用他自己所携带的钟记录的，而不同观察者携带的同样的钟的读数不必要一致。

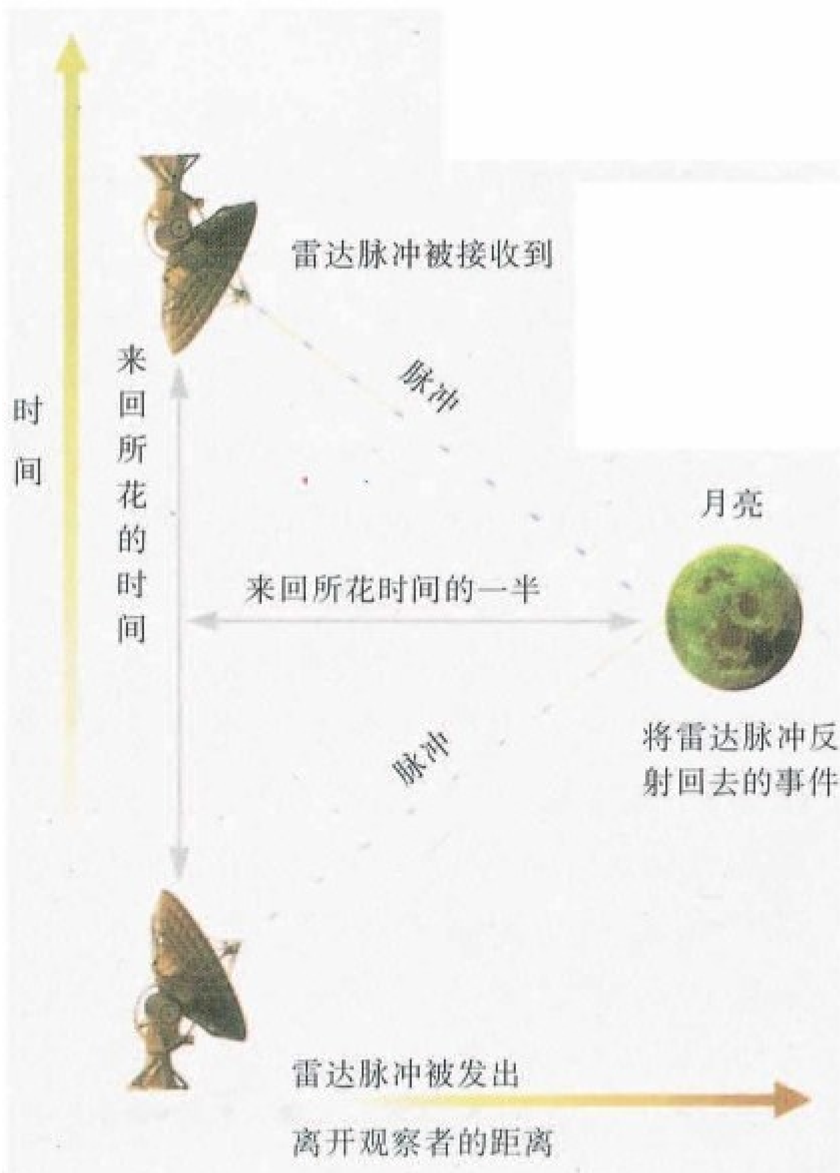


图2.8　时间用垂直坐标测量，离开观察者的距离用水平坐标测量。观察者在空间和时间里的路径用左边的垂线表示：到事件去和从事件来的光线的路线用对角线表示。

每个观察者都可以利用雷达发出光或射电波脉冲来说明一个事件在何处何时发生。一部分脉冲在事件反射回来后，观察者可在他接收到回波时测量时间：事件的时间可认为是脉冲被发出和反射被接收的两个时刻的中点；而事件的距离可取这来回行程时间的一半乘以光速（在这个意义上，一个事件是发生在空间的单独一点以及时间的指定一点的某件事）这个思想被显示在图2.8上，这是时空图的一个例子，利用这个步

骤，做相互运动的观察者对同一事件可赋予不同的时间和位置。没有一个特别的观察者的测量比任何其他人的更正确，但是所有这些测量都是相关的。只要一个观察者知道其他人的相对速度，他就能准确算出其他人会赋予同一事件的时间和位置。

现在我们正是用这种方法来准确地测量距离，因为我们可以将时间测量得比长度更为准确。实际上，米是被定义为光在以铯原子钟测量的0.000000003335640952秒内行进的距离（取这个特别数字的原因是，因为它对应于历史上的米的定义——按照保存在巴黎的特定铂棒上的两个刻度之间的距离）。同样地，我们可以用叫做光秒的更方便的新长度单位，这就是简单地定义为光在1秒中行进的距离，现在，我们在相对论中按照时间和光速来定义距离，从而，自然而然地，每个观察者都测量出光具有同样的速度（按照定义为每0.000000003335640952秒之1米）。没有必要引入以太的观念，正如迈克耳孙-莫雷实验显示的那样，以太的存在是无论如何检测不到的。然而，相对论迫使我们从根本上改变了我们的时间和空间观念。我们必须接受，时间不能完全脱离和独立于空间，而必须和空间结合在一起形成所谓的时空的客体。

我们通常的经验是可以用三个数或坐标去描述空间中的一点的位置。譬如，人们可以说屋子里的一点离开一堵墙7英尺（1英尺＝0.3048米），离开另一堵墙3英尺，并且比地面高5英尺。或者人们也可以用一定的纬度、经度和海拔来指定该点。人们可以自由地选用任何三个合适的坐标，虽然它们只在有限的范围内有效。人们不是按照在伦敦皮卡迪里广场以北和以西多少英里以及高于海平面多少英尺来指明月亮的位置，取而代之，人们可用离开太阳、离开行星轨道面的距离以及月亮与太阳的连线和太阳与临近的一个恒星——例如半人马座α——连线之夹角来描述它的位置。甚至这些坐标对于描写太阳在我们星系中的位置，或我们星系在本星系群中的位置也没有太多用处。事实上，人们可按照一族相互交叠的坐标碎片来描写整个宇宙。在每一碎片中，人们可用不同的三个坐标的集合来指明点的位置。

一个事件是在特定时刻和在空间中特定的一点发生的某件事。这样，人们可以用四个数或坐标来指定它。再说一遍，坐标系的选择是任意的；人们可以使用任何三个定义好的空间坐标和任何时间测度在相对论中，在时间和空间坐标之间没有真正的差别，犹如在任何两个空间坐标之间没有真正的差别一样。人们可以选择一族新的坐标，比如说，第

一个空间坐标是旧的第一和第二空间坐标的组合。例如，测量地球上一点的位置不用在伦敦皮卡迪里广场以北和以西的里数，而是用在它的东北和西北的里数。类似地，人们在相对论中可以用新的时间坐标，它是旧的时间（以秒作单位）加上往北离开皮卡迪里的距离（以光秒为单位）。

将一个事件的四坐标当做指定其在所谓的时空的四维空间中位置的手段经常是有助的。四维空间是不可想象的。对我个人来说，摹想三维空间已经足够困难！然而很容易画出二维空间图，例如地球的表面（地球的表面是两维的，因为可以用两个坐标，例如纬度和经度，来指明一点的位置。）我将通常使用二维图，向上增加的方向是时间，水平方向是其中一个空间坐标。不管另外两个空间坐标，或者有时用透视法将其中一个表示出来（这些被称为时空图，如图2.8所示）。例如，在图2.9中时间是向上的，并以年作为测量单位，而沿着从太阳到半人马座α连线的距离在水平方向上以英里为单位来测量。图中的左边和右边的垂线表示太阳和半人马座α通过时空的路径。从太阳发出的光线沿着对角线走，并且要花费4年的时间才能从太阳到达半人马座α。

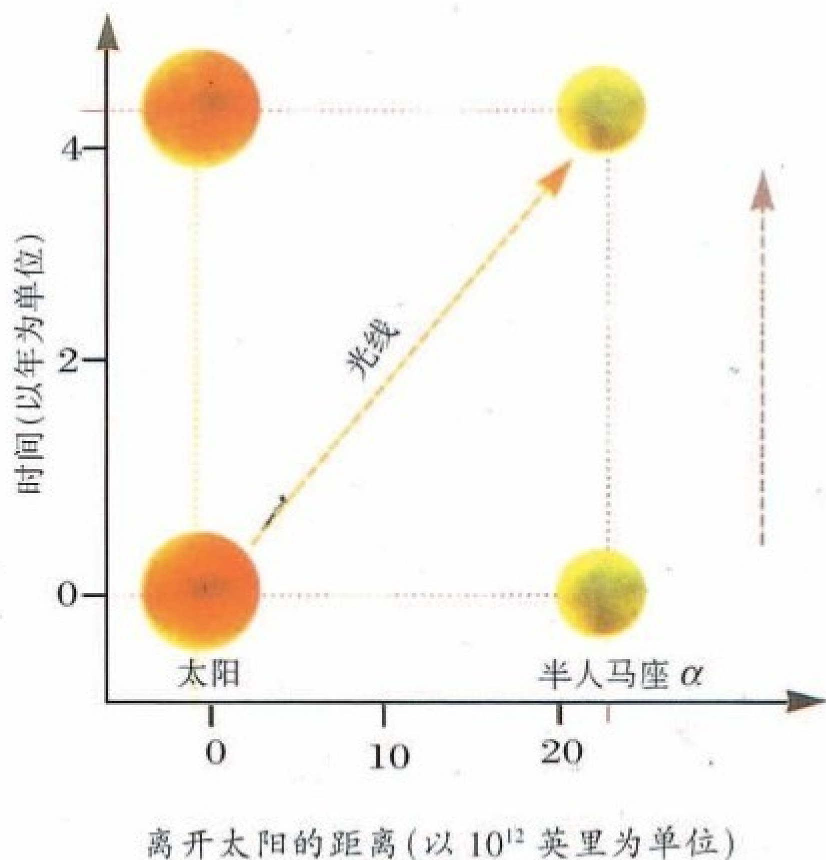


图2.9　显示一个光信号（对角线）从太阳到达半人马座α的时空图。太阳和半人马座α通过时空的路径是直线。

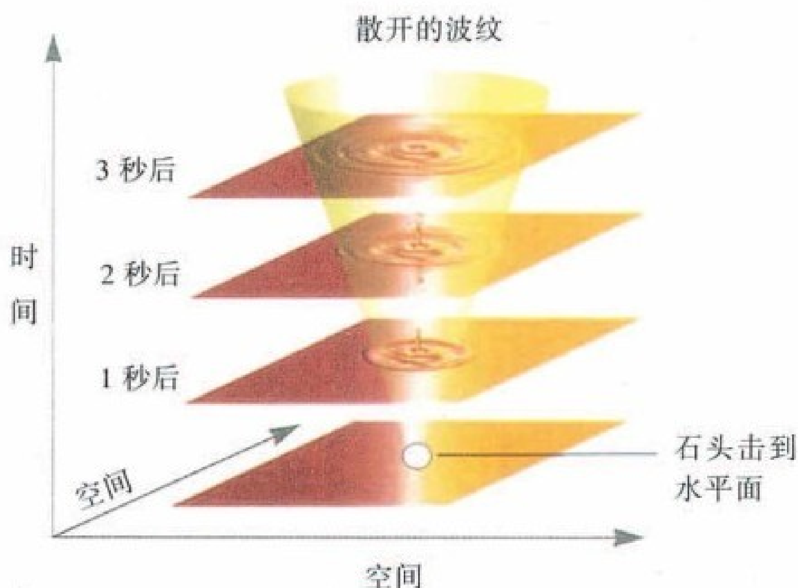


图2.10　在池塘表面上散开的涟漪的时空图这些扩大的水波圆圈在具有两个空间方向和一个时间方向的时空中画出一个圆锥。

正如我们已经看到的，麦克斯韦方程预言，不管光源的速度如何，光速应该是一样的，这已被精密的测量证实。由此推出，如果有一个光脉冲从一特定的空间点在一特定时刻发出，在时间的进程中，它就会作为一个光球面发散开来，而光球面的形状和大小与源的速度无关。在一百万分之一秒后，光就散开成一个半径为300米的球面；一百万分之二秒后，半径变成600米，等等。这正如同将一块石头扔到池塘里，水表面的涟漪向四周散开一样，涟漪作为一个圆周散开并随时间越变越大。如果人们把不同时刻涟漪的快照逐个堆叠起来，扩大的水波圆周就会画出一个圆锥，其顶点正是石块击到水面的地方和时刻（图2.10）。类似地，从一个事件散开的光在（四维的）时空里形成了一个（三维的）圆锥，这个圆锥称为事件的将来光锥。以同样的方法可以画出另一个称为过去光锥的圆锥，它表示所有可以用一个光脉冲传播到该事件的事件集合（图2.11）。

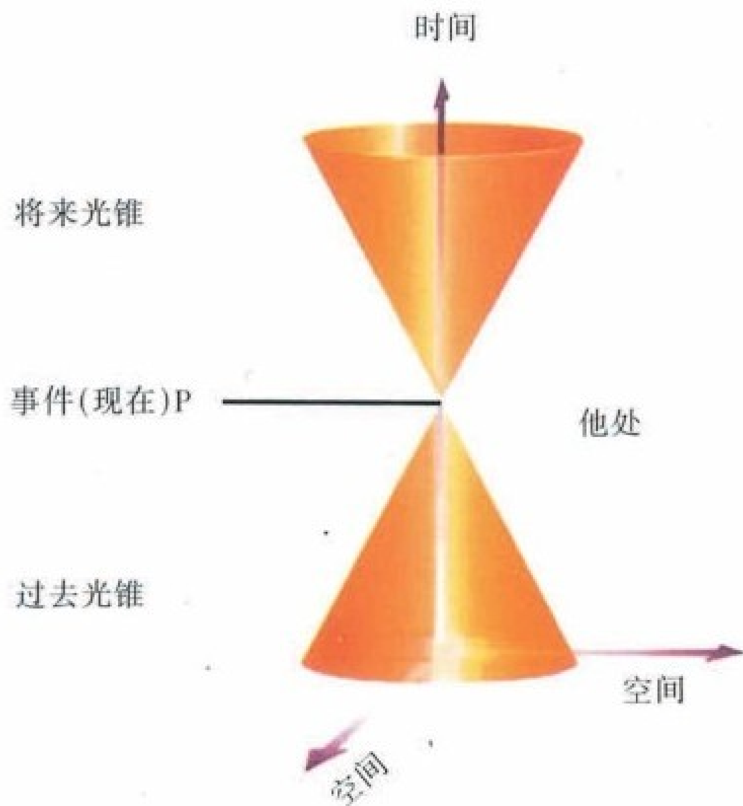


图2.11 从事件P出发的光脉冲的轨迹在时空中形成所谓“P的将来光锥”。类似地，“P的过去光锥”是所有将通过事件P的光线的轨迹这两个光锥把时空分成P的将来，过去和他处。

对于给定的事件P，人们可以将宇宙中的其他事件分成三类。从事件P出发由一个粒子或者波以等于或小于光速的速度行进能到达的那些事件称为属于P的将来。它们处于从事件P发射的膨胀的光球面之内或之上。这样，在时空图中它们就处于P的将来光锥的里面或上面。因为没有任何东西比光行进得更快，所以在P所发生的东西只能影响在P的将来中的事件。

类似地，P的过去可被定义为下述的所有事件的集合，从这些事件可能以等于或小于光速的速度行进到达事件P。这样，它就是能够影响发生在P的事件的所有事件的集合。不处于P的将来或过去的事件被称之为处于P的他处。在这种事件处所发生的东西既不能影响发生在P的事件，也不受发生在P的事件的影响。例如，假定太阳就在此刻停止发光，它不会对此刻的地球上的事情发生影响，因为它们是在太阳熄灭这一事件的他处（图2.12）。我们只能在8分钟之后才知道这一事件，这

是光从太阳到达我们所花费的时间。只有到那时候，地球上的事件才在太阳熄灭这一事件的将来光锥之内。类似地，我们也不知道这一时刻发生在宇宙中更远处的事：我们看到的从很远星系来的光是在几百万年之前发出的，至于我们看到的最远物体，光是在大约80亿年前发出的。这样，当我们看宇宙时，我们是在看它的过去。

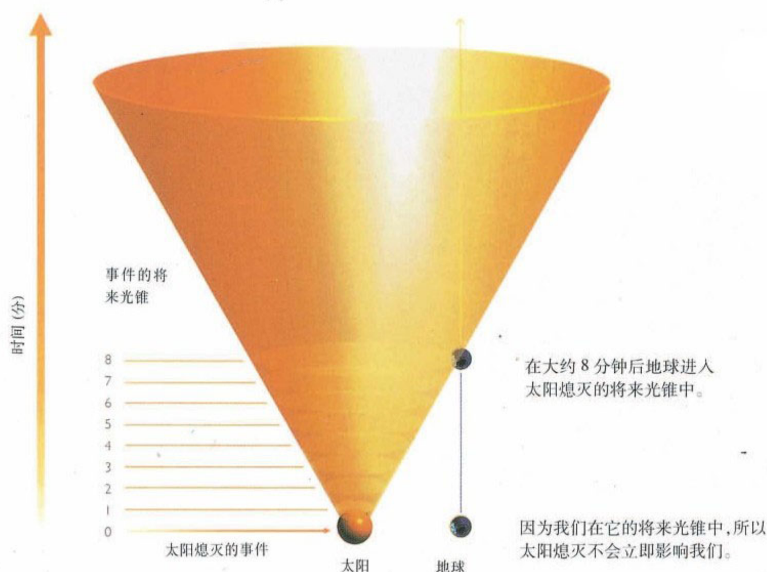


图2.12　在时空图中显示，我们要等待多久才能知道太阳的熄灭。

如果人们忽略引力效应，正如爱因斯坦和庞加莱1905年做的那样，人们就得到了称为狭义相对论的理论。对于时空中的每一事件我们都可以做一个光锥（所有从该事件发出的光的可能路径的集合），由于在每一事件处在任一方向上的光的速度都是一样的，所以所有光锥都是全等的，并朝着同一方向（图2.13）。此理论又告诉我们，没有任何东西行进得比光更快。这意味着，通过空间和时间的任何物体的轨迹必须由一根线来表示，而这根线落在它上面的每一事件的光锥之内（图2.14）狭义相对论非常成功地解释了如下事实：对所有观察者而言，光速都是一样的（正如迈克耳孙-莫雷实验所展示的那样），并成功地描述了当物体以接近于光速运动时会发生什么。然而，它和牛顿引力理论不相协调。牛顿理论说，物体之间相互吸引，其吸引力依赖于它们之间的距离。这意味着，如果我们移动其中一个物体，另一物体所受的力就会立即改变-或换言之，引力效应必须以无限速度行进，而不像狭义相对论要求的那样，只能以等于或低于光速的速度行进，爱因斯坦在1908年至1914年

之间进行了多次不成功的尝试，企图找到一个和狭义相对论协调的引力理论。1915年，他终于提出了今天我们称为广义相对论的理论。

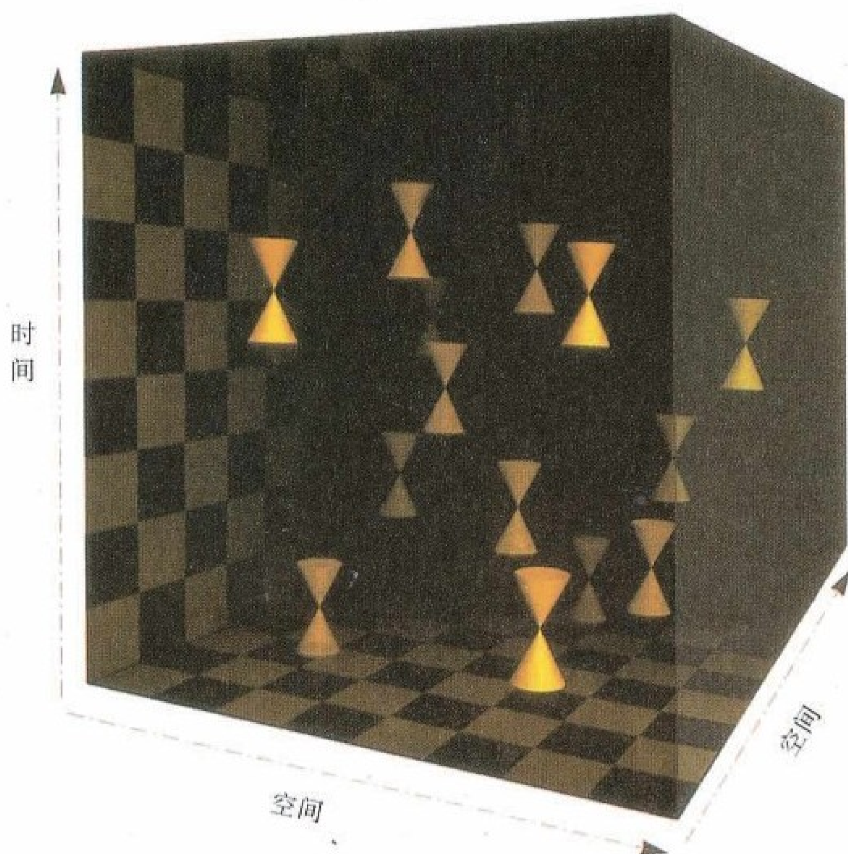


图2.13　当引力效应可被忽略时，所有事件的光锥都朝向同一方向：

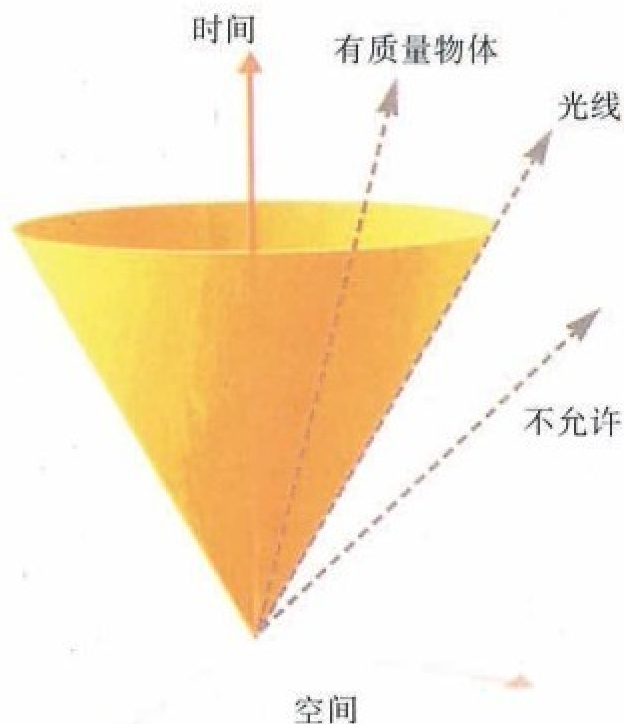
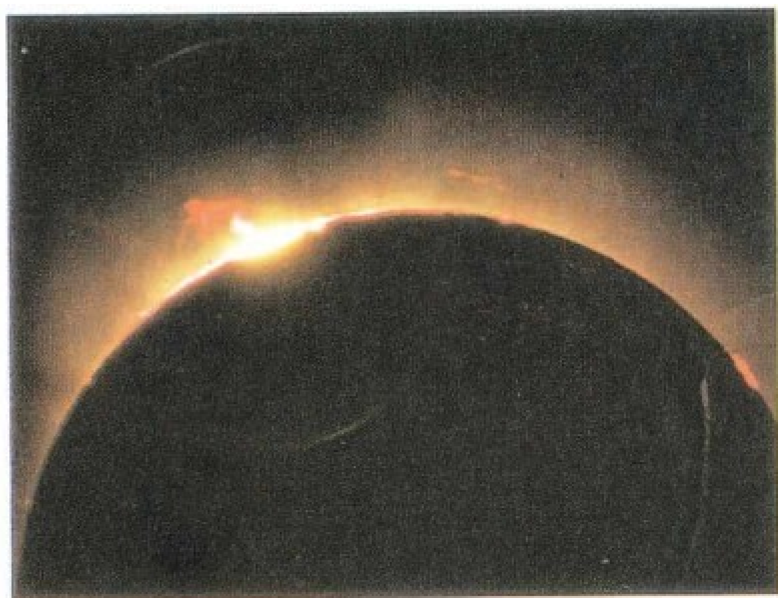


图2.14　具有质量的物体运动得比光慢因此，它们的轨迹在将来光锥之内。



1991年日全食时太阳圆盘。

爱因斯坦提出了革命性的思想，即引力不像其他种类的力，它只不

过是时空不是平坦的这一事实的结果，而早先人们假定时空是平坦的，在时空中的质量和能量的分布使它弯曲或“翘曲”。像地球这样的物体并非由于称为引力的力使之沿着弯曲轨道运动，相反，它沿着弯曲空间中最接近于直线路径的东西运动，这个东西称为测地线，一根测地线是邻近两点之间最短（或最长）的路径，例如，地球的表面是个弯曲的二维空间。地球上的测地线称为大圆，是两点之间最近的路（图2.15）。由于测地线是两个机场之间的最短程，这正是领航员叫飞行员飞行的航线。在广义相对论中，物体总是沿着四维时空的直线走。尽管如此，在我们看来它在三维空间中是沿着弯曲的路径。（这正如同看一架在非常多山的地面上空飞行的飞机。虽然它沿着三维空间的直线飞，但它在二维的地面上的影子却是沿着一条弯曲的路径。）

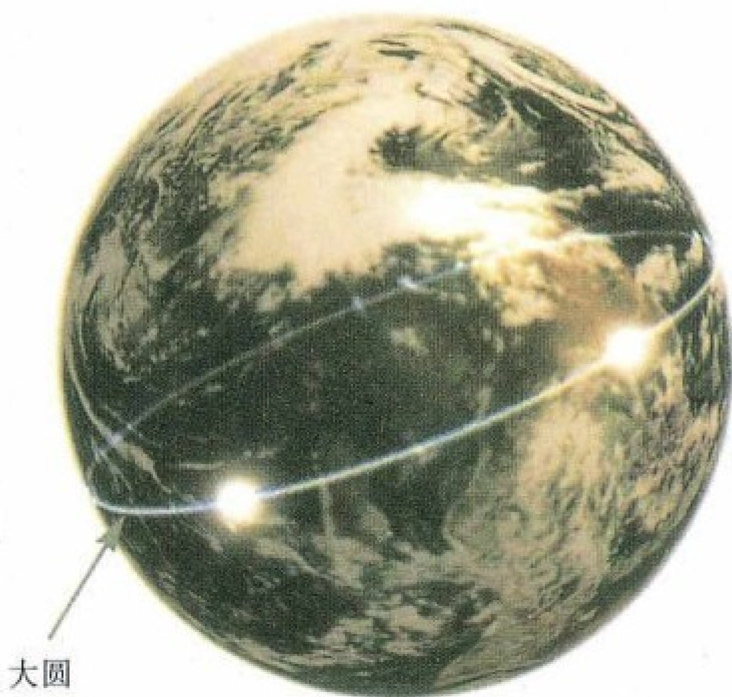


图2.15　在地球上，一条测地线是在所谓大圆上的两点之间的最短程。

太阳的质量以这样的方式弯曲时空，使得在四维的时空中地球虽然沿着直线的路径运动，它却让我们看起来是沿着三维空间中的一个圆周轨道运动。事实上，广义相对论和牛顿引力理论预言的行星轨道几乎完全一致。然而，对于水星，这颗离太阳最近、受到引力效应最强，轨道被拉得相当长的行星，广义相对论预言其轨道椭圆的长轴应围绕着太阳

以大约每1万年1度的速率进动。尽管这个效应如此小，但在1915年前即被注意到了，并被作为爱因斯坦理论的第一个验证。近年来，其他行星和牛顿理论预言的甚至更小的轨道偏差已被雷达测量到，并且发现和广义相对论的预言相符。

光线也必须在时空中遵循测地线。时空是弯曲的事实再次意味着，光线在空间中看起来不是沿着直线旅行。这样，广义相对论预言光线必须被引力场折弯。譬如，理论预言，由于太阳的质量的缘故，太阳近处的点的光锥会向内稍微弯折。这表明，从遥远恒星发出的刚好通过太阳附近的光线会被偏折很小的角度，对于地球上的观察者而言，这恒星似乎位于不同的位置（图2.16）。当然，如果从恒星来的光线总是在靠太阳很近的地方穿过，则我们就无从分辨，是光线被偏折了，还是该恒星实际上就在我们看到的地方。然而，由于地球围绕着太阳公转，不同的恒星显得从太阳后面通过，并且它们的光线受到偏折。所以，相对于其他恒星而言，它们改变了表观的位置。

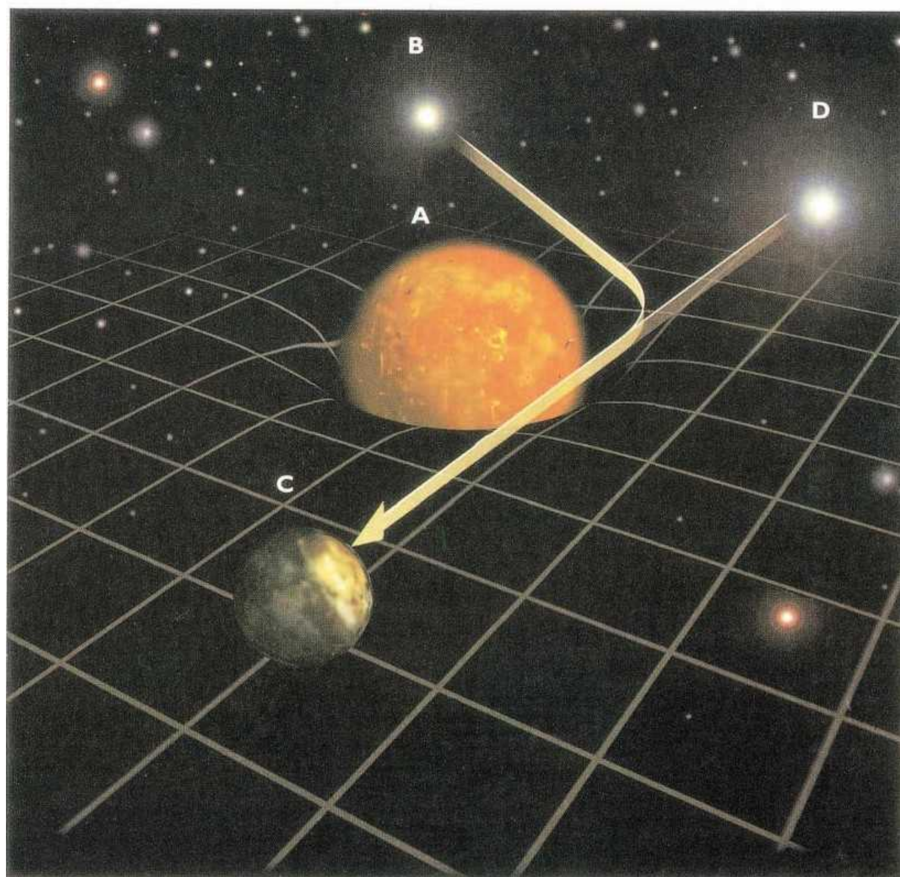


图2.16　太阳（A）的质量畸变了它附近的时空从一个远处的恒星（B）来的通过太阳附近的光被它折射了，这样在地球（C）上看来，它似乎来自另外一个方向（D）。

在正常情况下，要观察到这个效应非常困难，这是由于太阳的光线使得人们不可能观看天空上出现在太阳附近的恒星。然而，在日食时就可能观察到，这时太阳的光线被月亮遮住了。由于第一次世界大战正在进行，爱因斯坦光偏折的预言不可能在1915年立即得到验证。直到1919年，一个英国的探险队从西非观测日食，证明光线确实像理论所预言的那样被太阳偏折。这次英国人证明德国人的理论被欢呼为战后两国和好的伟大行动。具有讽刺意味的是，后来人们检查这回探险所拍的照片，发现其误差和企图测量的效应同样大。他们的测量纯属运气，或是已知他们所要得的结果的情形，这在科学上时有发生。然而，后来的多次观测准确地证实了光偏折。



图2.17　人们发现，安放在塔基的更靠近地球的钟比安放在塔顶的钟走得慢一些。

广义相对论的另一个预言是，在像地球这样的大质量的物体附近，时间显得流逝得更慢一些。这是因为光能量和它的频率（光在每秒钟里波动的次数）有一种关系：能量越大，则频率越高。当光从地球的引力场往上行进，它失去能量，因而其频率下降（这表明两个相邻波峰之间的时间间隔变大。）在上面的某个人看来，下面发生的每一件事情都显得需要更长的时间。1962年，人们利用一对安装在水塔顶上和底下的非常准确的钟，验证了这个预言（图2.17）。发现底下的那只更接近地球的钟走得较慢，这和广义相对论正好相符。目前，随着基于卫星信号的非常精确的导航系统的出现，地球上的不同高度的钟的速度的差异，在实用上具有相当的重要性，如果人们无视广义相对论的预言，计算的位置会错几英里。

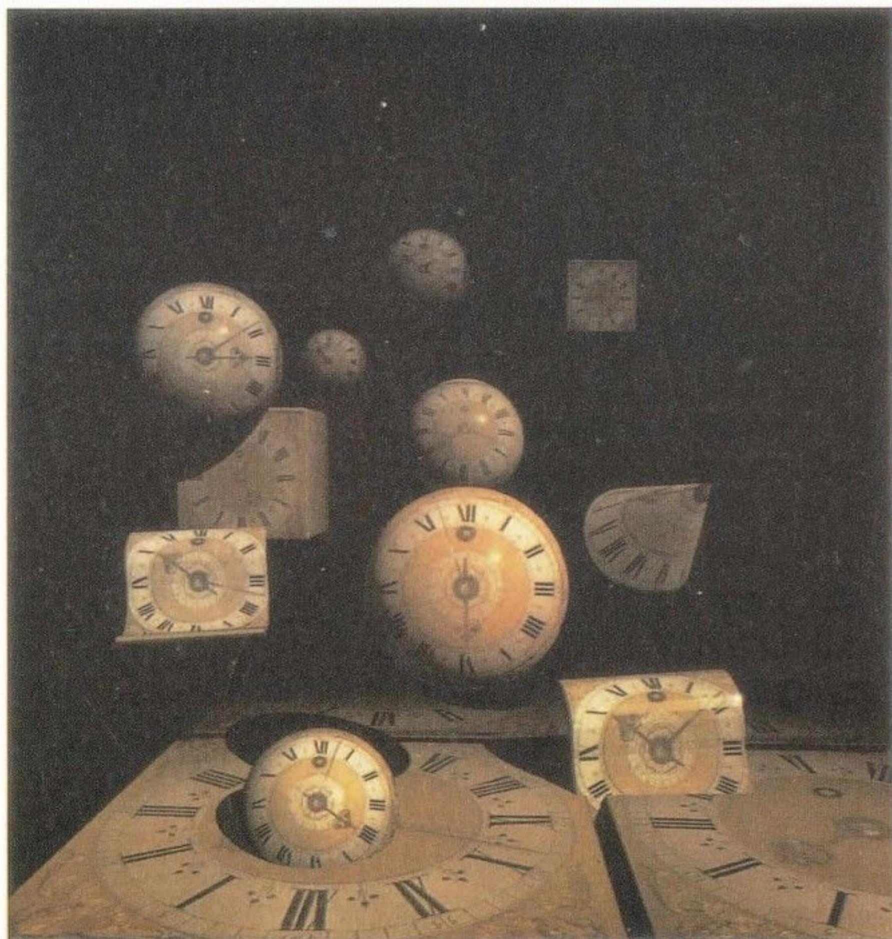
牛顿运动定律使在空间中的绝对位置的观念寿终正寝。而相对论摆脱了绝对时间。考虑一对双生子。假定其中一个孩子去山顶上生活，而另一个留在海平面，第一个将比第二个老得快些。这样，如果他们再次相会，一个会比另一个更老一些。在这个例子中，年纪的差别会非常小。但是，如果有一个孩子在以近于光速运动的航天飞船中作长途旅行，这种差别就会大得多。当他回来时，他会比留在地球上另一个年轻得多。这叫做双生子佯谬，但是，只是对于头脑中仍有绝对时间观念的人而言，这才是佯谬。在相对论中并没有唯一的绝对时间，相反，每个人都有他自己的时间测度，这依赖于他在何处并如何运动。

1915年之前，空间和时间被认为是事件在其中发生的固定舞台，而它们不受在其中发生的事件的影响。即便在狭义相对论中，这也是对的。物体运动，力吸引并排斥，但时间和空间则完全不受影响地延伸着。空间和时间很自然地被认为无限地向前延伸。

然而在广义相对论中，情况则完全不同。这时，空间和时间变成为动力量：当物体运动，或者力作用时，它影响了空间和时间的曲率；反过来，时空的结构影响了物体运动和力作用的方式。空间和时间不仅去影响、而且被发生在宇宙中的每一件事影响。正如人们没有空间和时间的概念不能谈论宇宙的事件一样，同样地，在广义相对论中，在宇宙界限之外讲空间和时间也是没有意义的。

在以后的几十年中，对空间和时间的这种新理解是对我们宇宙观的变革，旧的宇宙观被新的宇宙观取代了。前者认为宇宙基本上是不变的，它可能已经存在了无限长的时间，并将永远继续存在下去；后者则

认为宇宙在运动，在膨胀，它似乎开始于过去的某一个时间，并也许会在将来的某一个时间终结。这个变革正是下一章的内容。几年之后，它又是我研究理论物理的起点。罗杰·彭罗斯和我证明了，爱因斯坦广义相对论意味着，宇宙必须有个开端，并且可能有个终结。



现在时间和空间被认为是每个单独粒子或者行星的动力量，根据它的位置和运动状态而具有自己唯一的时间测度。

第三章　膨胀的宇宙



螺旋星系——M 51。我们自身的星系被认为和这样的恒星旋涡很类似

如果在一个清澈无月的夜晚仰望星空，人们能看到的最亮的星体最可能是金星、火星、木星和土星这几颗行星，还有巨大数目的正像我们太阳但离开我们远得多的恒星。事实上，随着地球围绕着太阳公转，某些固定的恒星相互之间的位置看起来确实起了非常微小的变化——它们不是完全固定不动的！这是因为它们距离我们较近一些。当地球围绕着太阳公转时，相对于更远处的恒星背景，我们从不同的位置观测它们（图3.1）。这是幸运的，因为它使我们能直接测量这些恒星离开我们的距离，它们离我们越近，就显得移动得越多。最近的恒星叫做比邻星，它离我们大约4光年那么远（从它发出的光大约花费4年才能到达地球），也就是大约23万亿英里的距离。其他大部分肉眼可见的恒星离开我们的距离均在几百光年之内。与之相比，太阳仅仅在8光分那么远！可见的恒星散布在整个夜空，但是特别集中在一条称为银河的带上。远在公元

1750年，有些天文学家就提出，如果大部分可见的恒星处在一个单独的碟状的结构中，则银河的外观可以得到解释。这个结构便是今天我们称为螺旋星系的一个例子。之后不过几十年，天文学家威廉·赫歇尔爵士通过对大量恒星的位置和距离进行过细的编目分类，就证实了这个观念。即便如此，这个思想在本世纪初才完全被人们接受。



图3.1　随着地球绕太阳公转，附近恒星的位置相对于更遥远的恒星显得在运动。

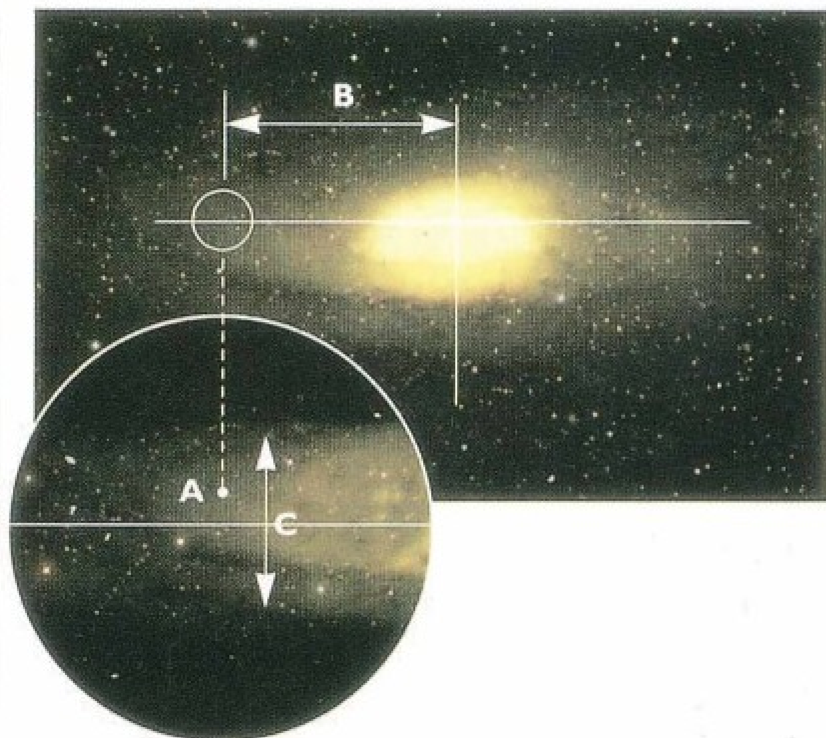


图3.3　天文学家们一致认为，我们的太阳大约离开中心（B）25000光年，在圆盘上离开星系平面（A）68光年。外圆盘在我们邻近（C）的厚度大约为1300光年。

1924年，我们现代的宇宙图象才被奠定。那一年，美国天文学家埃德温·哈勃证明了，我们的星系不是唯一的星系。事实上，还存在其他许多星系，在它们之间是巨大的空虚的太空。为了证明这些，他必须确定这些星系的距离。这些星系是如此之遥远，不像邻近的恒星那样，它们确实显得是固定不动的。所以哈勃被迫用间接的手段去测量这些距离。由于恒星的视亮度取决于两个因素：它辐射出来多少光（它的光度）以及它离我们多远。对于近处的恒星，我们可以测量其视亮度和距离，这样我们可以算出它的光度。相反，如果我们知道其他星系中恒星的光度，我们可用测量它们的视亮度来算出它们的距离：哈勃注意到，当某些类型的恒星近到足以被我们测量时，它们有相同的光度；所以他提出，如果我们在其他星系找出这样的恒星，我们可以假定它们有同样的光度——这样就可计算出那个星系的距离。如果我们能对同一星系中的许多恒星这样做，并且计算结果总是给出相同的距离，则我们就会相当地信赖自己的估计。

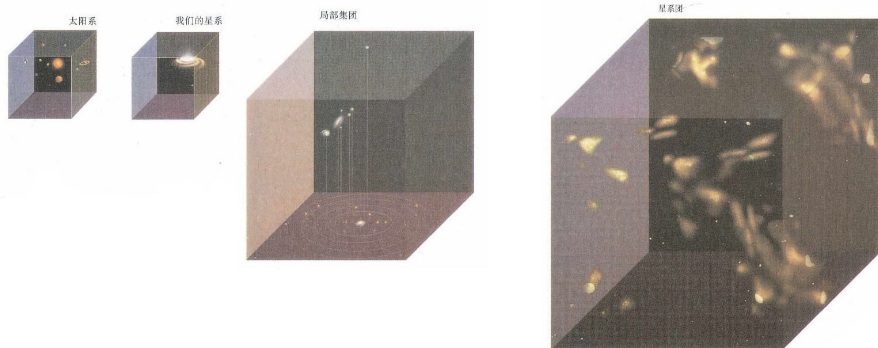
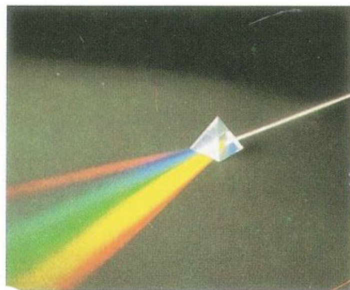
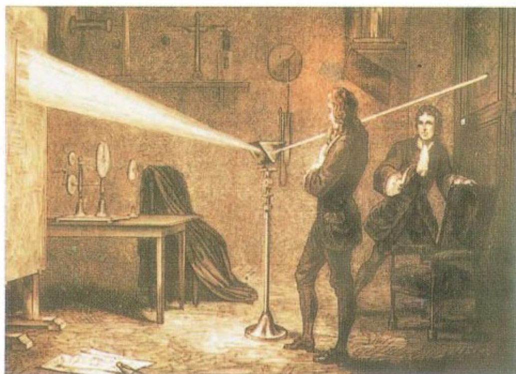


图3.2　从左至右：我们的太阳只是组成我们星系，银河系的1000亿个恒星之一。银河系只是局部集团的许多星系之一。局部集团只是形成我们宇宙中最大已知结构的几千个集团和星系团之一。

埃德温·哈勃用上述方法算出了9个不同星系的距离。现在我们知道，我们的星系只是用现代望远镜可以看到的几千亿个星系中的一个，每个星系本身都包含有几千亿颗恒星（图3.3）。第46页的插图所示的便是一个螺旋星系的图，从生活在其他星系中的人来看我们的星系，想必也类似这个样子。我们生活在一个宽约为10万光年并慢慢旋转着的星系中；在它的螺旋臂上的恒星围绕着它的中心公转一圈大约花费几亿年。我们的太阳只不过是一颗平常的、平均大小的、黄色的恒星，它位于一个螺旋臂的内边缘附近（图3.2）。我们离开亚里士多德和托勒密的观念肯定相当远了，那时人们认为地球是宇宙的中心！

恒星离开我们是如此之遥远，使我们只能看到极小的光点，而看不到它们的大小和形状。这样怎么能区分不同的恒星种类呢？对于绝大多数的恒星而言，只有一个特征可供观测——光的颜色。牛顿发现，如果太阳光通过一个称为棱镜的三角形状的玻璃块，就会被分解成像在彩虹中一样的分颜色（它的光谱）。将一台望远镜聚焦在一个单独的恒星或星系上，人们就可类似地观察到从这恒星或星系来的光谱。不同的恒星具有不同的光谱，但是不同颜色的相对亮度总是和人们期望从一个红热的物体发出的光的光谱完全一致。（实际上，从任何不透明的灼热的物体发出的光，有一个只依赖于它的温度的特征光谱——热谱。这意味着可以从恒星的光谱得知它的温度。）此外，我们发现，某些非常特定的颜色在恒星光谱里丢失，这些失去的颜色可依不同的恒星而异，由于我们知道，每一化学元素吸收非常独特的颜色族系，将它们和恒星光谱中失去的颜色相比较，我们就可以准确地确定恒星大气中存在哪种元素。

艾萨克·牛顿利用棱镜把白光分解成光谱

在20世纪20年代，当天文学家开始观察其他星系中的恒星光谱时，他们发现了某些最奇异的现象：它们和我们的银河系一样具有吸收的特征线族，只是所有这些线族都向光谱的红端移动了同样的相对的量为了理解其含意，我们必须首先理解多普勒效应。正如我们已经看到的，可见光由电磁场的起伏或波动构成。光的波长（或者相邻波峰之间的距离）极其微小，约为0.0000004至0.0000008米。光的不同波长正是人眼看成不同颜色的东西，最长的波长出现在光谱的红端，而最短的波长在光谱的蓝端。现在想象在离开我们固定的距离处有一个光源——例如一颗恒星——以固定的波长发出光波（图3.4a）。显然，我们接收到的波长和发射时的波长一样（星系的引力场没有强到足以对它产生明显的效应，现在假定这恒星光源开始向我们运动。当光源发出第二个波峰时，它离开我们较近一些，这样两个波峰之间的距离比恒星静止时较小。这意味着，我们接收到的波的波长比恒星静止时较短。相应地，如果光源离开我们运动，我们接收的波的波长将较长。这意味着，当恒星离开我们而去时，它们的光谱向红端移动（红移）；而当恒星趋近我们而来时，光谱则被蓝移。这个称作多普勒效应的频率和速度的关系是我们日常熟悉的例如听一辆小汽车在路上驶过：当它趋近时，它的发动机的音调变高（对应于声波的短波长和高频率）；当它经过我们身边而离开时，它的音调变低（图3.5）。光波或射电波的行为与之类似。警察就是利用多普勒效应的原理，靠测量射电波脉冲从车上反射回来的波长来测定车速。

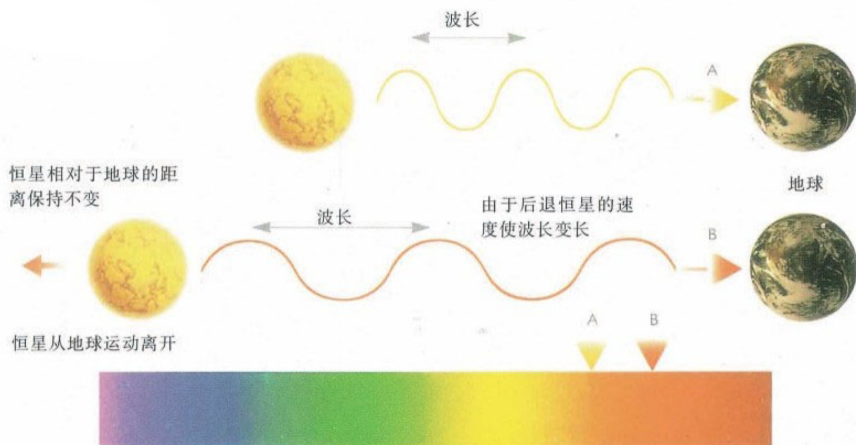


图3.4a　一个相对于地球静止的恒星发射出固定波长的光，该波长和我们观察到的相同。如果该恒星离开我们运动而去，则两个波峰之间的距离被增加，而我们觉得它的光谱向红端移动。

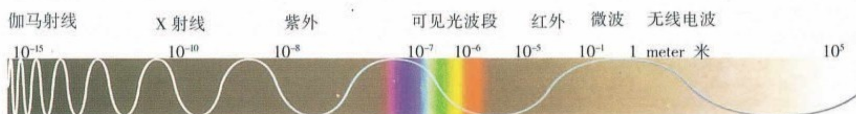
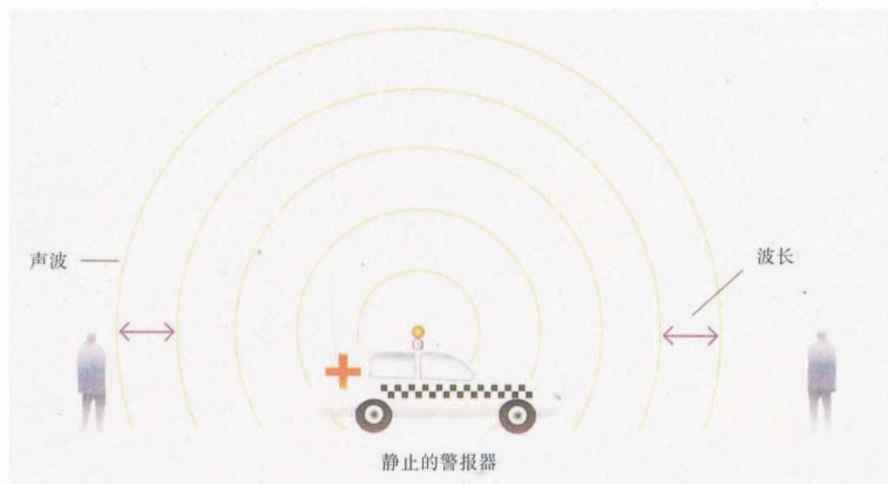


图3.4b　全光谱覆盖比我们能观察到的光谱大得多的波长范围。它们从诸如伽马射线之类的非常短的波长延伸到诸如无线电波之类的非常长的波长的范围。



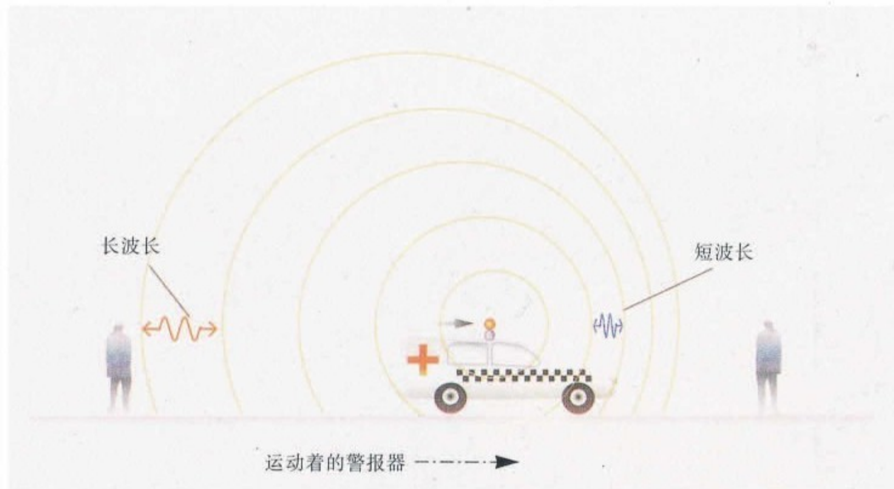
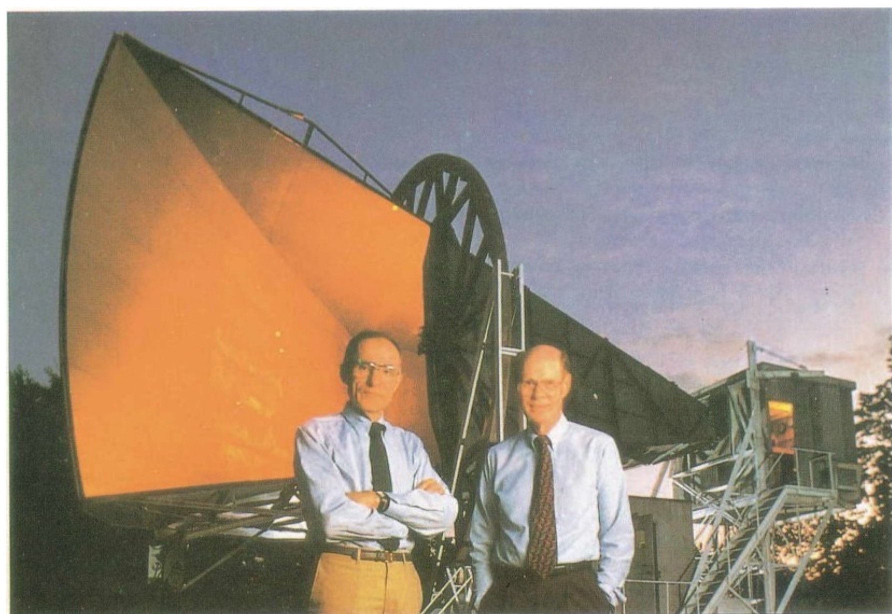


图3.5　多普勒效应是包括声波和电磁波在内的所有种类波的一个性质。当一个发射源，诸如救护车警报器向着观察者驶来时，波就向较高频率位移，但它离开接收者而去时，波就向较低频率位移。

在哈勃证明了其他星系存在之后的几年里，他花时间为它们的距离编目以及观察它们的光谱，那时候大部分人都以为，这些星系完全是随机地运动的，所以预料会发现和红移光谱一样多的蓝移光谱。因此，当他发现大部分星系是红移的：几乎所有都远离我们而去时，确实令人十分惊异！1929年哈勃发表的结果更令人惊异：甚至星系红移的大小也不是随机的，而是和星系离开我们的距离成正比。或换句话讲，星系越远，它离开我们运动得越快！这表明宇宙不能像人们原先所想象的那样处于静态，而实际上是在膨胀；不同星系之间的距离一直在增加着。

宇宙膨胀的发现是20世纪最伟大的智力革命之一。事后想起来，何以过去从来没有人想到这一点？！牛顿或其他人早就应该意识到，静态的宇宙在引力的影响下会很快开始收缩然而现在假定宇宙正在膨胀，如果它膨胀得相当慢，引力就会使之最终停止膨胀，然后开始收缩。但是，如果它以比某一临界率更大的速度膨胀，引力则永远不足够强到使它停止膨胀，宇宙就永远继续膨胀下去。这有点像当一个人在地球表面引燃火箭上天时发生的情形，如果火箭的速度相当小，引力将最终使火箭停止并折回地面；另一方面，如果火箭具有比某一临界值（大约每秒7英里）更大的速度，引力的强度就不足以将其拉回，这样它将继续永远飞离地球。19世纪、18世纪甚至17世纪晚期的任何时候，人们都可以从牛顿的引力论预言出宇宙的这个行为。然而，静态宇宙的信念是如此之强，以至于一直维持到了20世纪的早期。甚至爱因斯坦于1915年发表

其广义相对论时，还是这么肯定宇宙必须是静态的，以至于他在其方程中引进一个所谓的宇宙常数来修正自己的理论，使静态的宇宙成为可能。爱因斯坦引入一个新的“反引力”，这力不像其他力那样，不由任何特别的源引起，而恰恰是时空结构固有的。他宣称，时空有一内在的膨胀的趋向，这可以用来刚好去平衡宇宙间所有物质的相互吸引，由此导致一个静态的宇宙。当爱因斯坦和其他物理学家正在想方设法避免广义相对论的非静态宇宙的预言时，看来只有一个人，即俄国物理学家和数学家亚历山大·弗里德曼愿意只用广义相对论着手解释它。



阿诺·彭齐亚斯（左）和罗伯特·威尔逊（右）在新泽西州荷姆德尔角状天线之前。他们利用此天线在无意中发现了宇宙微波背景。

弗里德曼对于宇宙作了两个非常简单的假定：我们不论往哪个方向看，也不论在任何地方进行观察，宇宙看起来都是一样的。弗里德曼指出，仅仅从这两个观念出发，我们就应该预料宇宙不是静态的。事实上，弗里德曼在1922年所做的预言，正是几年之后埃德温·哈勃观察到的结果。

很清楚，关于宇宙在任何方向上都显得一样的假设，实际上是不对的。例如，正如我们看到的，我们星系中的其他恒星形成了横贯夜空的叫做银河系的光带。但是如果看得更远，星系数目则或多或少显得是相同的。所以假定我们在比星系间距离更大的尺度下来观察，而不管在小尺度下的差异，则宇宙确实在所有的方向看起来是大致一样的。在很长

的时间里，这为弗里德曼的假设——作为实际宇宙的粗糙近似提供了充分的理由。但是，近世出现的一桩幸运事件揭示了以下事实，弗里德曼假设实际上异常准确地描述了我们的宇宙。

1965年，美国新泽西州贝尔电话实验室的两位美国物理学家阿诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊正在检测一个非常灵敏的微波探测器。（微波正如光波，但是它的波长大约为一厘米。）他们的探测器收到了比预想的还要大的噪声。彭齐亚斯和威尔逊为此而忧虑，这噪声不像是从任何特别的方向来的。首先他们在探测器上发现了鸟粪并检查了其他可能的故障，但很快就排除了这些可能性。他们知道，当探测器倾斜地指向天空时，从大气层里来的任何噪声都应该比原先垂直指向时更强，因为从接近地平线方向接收比起直接从头顶方向接收，光线要穿过多得多的大气。然而，不管探测器朝什么方向，这额外的噪声都是一样的，所以它一定是从大气层以外来的。并且，它在白天、夜晚、整年都是一样，尽管地球围绕着自己的轴自转或围绕太阳公转。这表明，这辐射必须来自太阳系以外，甚至星系之外，否则，当地球的运动使探测器指向不同方向时，噪声就会变化。

事实上，我们知道这辐射必须穿过我们可观察到的宇宙的大部分才行进至此，并且由于它在不同方向上都一样，如果只在大尺度下，这宇宙也必须是各向同性的。现在我们知道，不管我们朝什么方向看，这噪声的变化总是非常微小：这样，彭齐亚斯和威尔逊无意中非常精确地证实了弗里德曼的第一个假设。然而，由于宇宙并非在每一个方向上，而是在大尺度的平均上完全相同，所以微波也不可能在每一个方向上完全相同。在不同的方向之间必须有一些小变化。1992年宇宙背景探险者，或称为COBE，首次把它们检测到，其幅度大约为十万分之一。尽管这些变化很小，但是正如我们将在第八章解释的，它们非常重要。



图3.6　膨胀的宇宙像一个正在被吹胀的气球。气球表面上的斑点相互离开。但是，没有一个斑点是膨胀的中心。

大约与彭齐亚斯和威尔逊在研究探测器中的噪声的同时，在附近的普林斯顿大学的两位美国物理学家，罗伯特·狄克和詹姆士·皮帕尔斯也对微波感兴趣。他们正在研究乔治·伽莫夫（曾为亚历山大·弗里德曼的学生）的一个见解：早期的宇宙一定是非常密集的、白热的。狄克和皮帕尔斯认为，我们应该仍然能看到早期宇宙的白热，这是因为从它的非常远的部分来的光，刚好现在才到达我们这儿。然而，宇宙的膨胀把光红移得如此厉害，现在只能作为微波辐射被我们观察到。正当狄克和皮帕尔斯准备寻找这辐射时，彭齐亚斯和威尔逊听到了他们的工作，并且意识到，他们自己已经找到了它。为此，彭齐亚斯和威尔逊被授予1978年的诺贝尔奖（狄克和皮帕尔斯看来有点难过，更别提伽莫夫了）。

现在初看起来，关于宇宙在任何方向看起来都一样的所有证据似乎暗示，我们在宇宙中的位置有点特殊。特别是，如果我们看到所有其他的星系都远离我们而去，那似乎我们必须在宇宙的中心。然而，还存在另外的解释：从任何其他星系上看宇宙，在任何方向上也都一样。正如我们已经看到的，这是弗里德曼的第二个假设。我们没有任何科学的证据去相信或反驳这个假设。我们之所以相信它只是基于谦虚：因为如果宇宙只在围绕我们的所有方向显得相同，而在围绕宇宙的其他点却并非如此，则是非常令人惊奇的！在弗里德曼模型中，所有的星系都相互直接离开。这种情形很像一个画上好多斑点的气球被逐渐吹胀。当气球膨胀时，任何两个斑点之间的距离加大，但是没有一个斑点可认为是膨胀的中心（图3.6）。此外，斑点相离得越远，则它们相互离开得越快。类似地，在弗里德曼的模型中，任何两个星系相互离开的速度和它们之间的距离成正比。所以人们预言，星系的红移应与离开我们的距离成正比，这正是哈勃发现的。尽管他的模型取得了成功并预言了哈勃的观测，但是直到1935年，为了响应哈勃的宇宙均匀膨胀的发现，美国物理学家霍瓦德·罗伯逊和英国数学家阿瑟·瓦尔克发现了类似的模型后，弗里德曼的工作才在西方被普遍知道。

虽然弗里德曼只找到一个模型，但其实满足他的两个基本假设的共有三类模型。在第一类模型（即弗里德曼找到的）中，宇宙膨胀得足够慢，这样不同星系之间的引力使膨胀减缓，并最终停止。然后星系开始相互靠近，而宇宙收缩。图3.7表示随着时间增加两个邻近星系之间距离的变化。刚开始时距离为零，接着它增长到最大值，然后又减小到零。在第二类解中，宇宙膨胀得如此之快，引力虽然能使之缓慢一些，却永远不能使之停止。图3.8展示在此模型中的邻近星系之间的距离。刚开始

时距离为零，最后星系以稳恒的速度相互离开。最后，还有第三类解，宇宙的膨胀快到足以刚好避免坍缩。正如图3.9所示的，星系的距离也从零开始，然后永远增大，然而，虽然星系分开的速度永远不会完全变为零，但是却会越变越小。

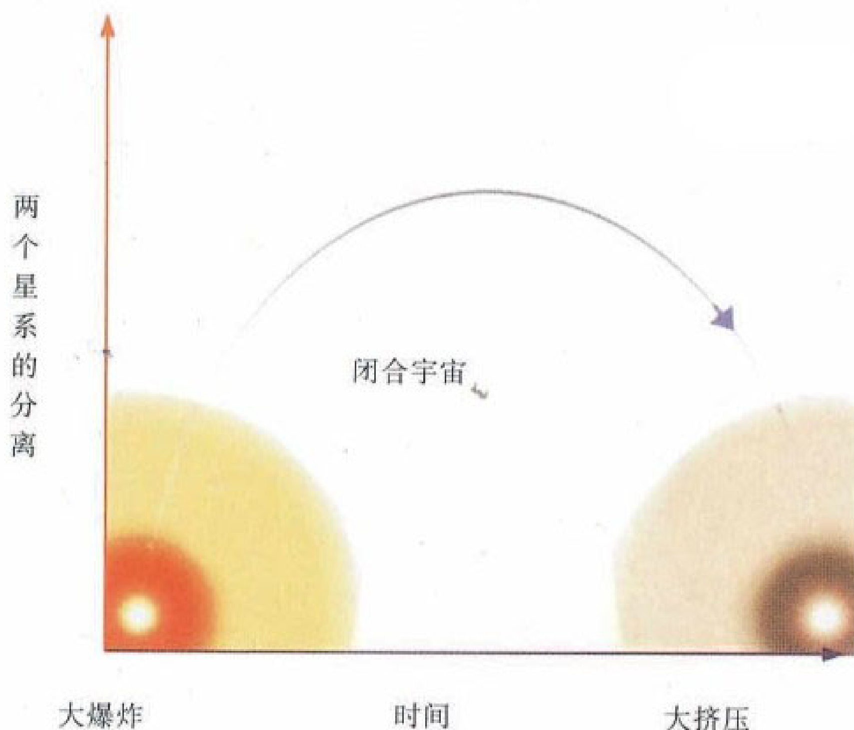


图3.7　在弗里德曼的宇宙模型中所有星系一开始都相互离开宇宙一直膨胀到它的最大尺度，然而被收缩回到一点。

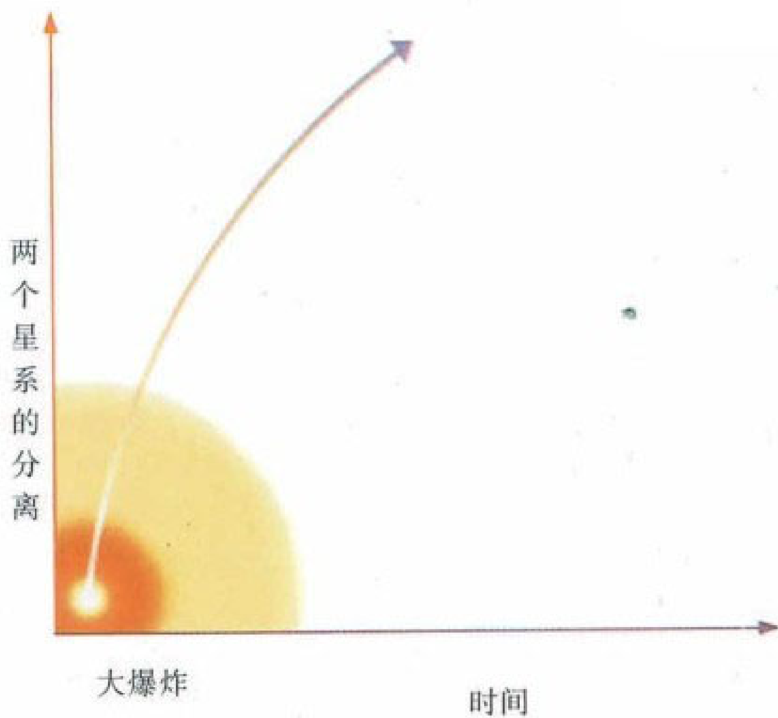


图3.8　在宇宙的“开放”模型中，引力永远不能战胜星系的运动，而宇宙永远膨胀下去。

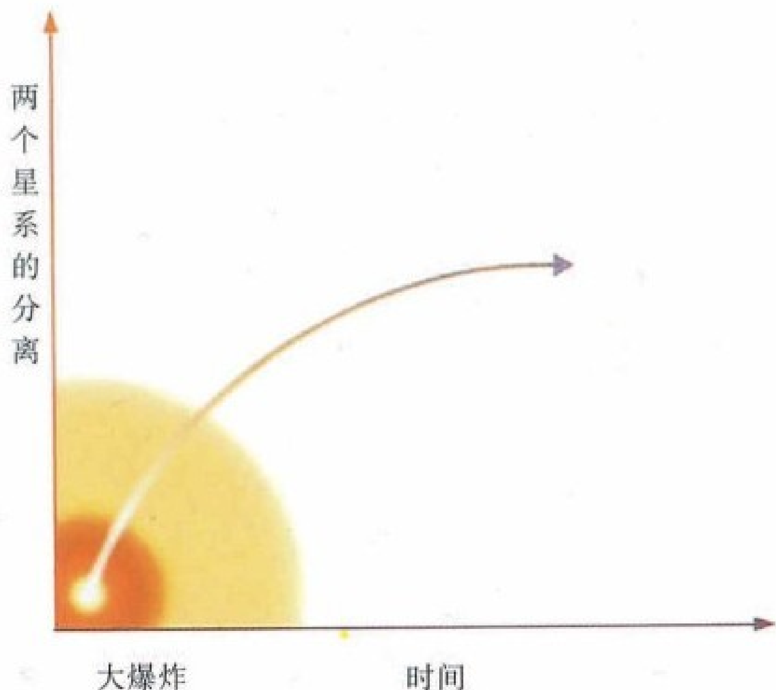


图3.9　在宇宙的“平坦”模型中，引力吸引刚好和星系的运动平衡。宇宙避免坍缩，而星系的运动越来越慢。但是，永远不会完全静止。

第一类弗里德曼模型的奇异特点是，宇宙在空间上不是无限的，但却没有边界。引力如此强大，将空间折弯使之再绕回到自身，这样就和地球的表面相当类似。如果有人在地球的表面上沿着一定的方向不停地旅行，他将永远不会遇到一个不可超越的障碍或从边缘掉下去，反而最终回到他出发的那一点。第一类弗里德曼模型中的空间与此非常相像，只不过地球表面是二维的，而它是三维的罢了。第四维时间在范围上也是有限的，然而它像一根有两个端点或边界即开端和终端的线。以后我们会看到，当人们将广义相对论和量子力学的不确定性原理结合在一起时，就可能使空间和时间都成为有限的，而没有任何边缘或边界。

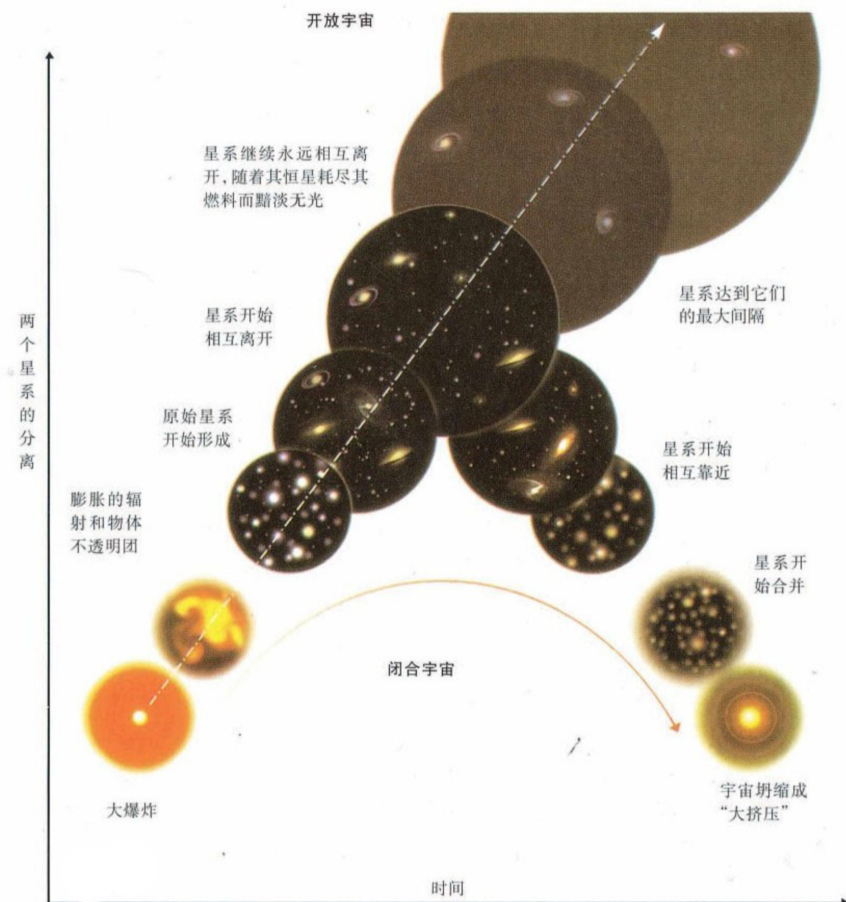


图3.10

一个人可以绕宇宙一周最终回到出发点的思想是科学幻想的好题材，但它在实际上并没有多大意义。因为可以证明，一个人还没来得及绕回一圈，宇宙已经坍缩到了零尺度。你必须旅行得比光还快，才能在宇宙终结之前绕回到你的出发点——而这是不允许的！

在第一类弗里德曼模型中，宇宙膨胀后又坍缩，空间如同地球表面那样，弯曲后又折回到自身。在第二类永远膨胀的模型中，空间以另外的方式弯曲，如同一个马鞍面。所以，在这种情形下，空间是无限的。最后，在第三类刚好以临界速率膨胀的弗里德曼模型中，空间是平坦的（而因此也是无限的）。

但是究竟何种弗里德曼模型描述我们的宇宙呢？宇宙最终会停止膨胀并开始收缩，还是将永远膨胀下去吗？要回答这个问题，我们必须知

道现在的宇宙膨胀速度和它现在的平均密度。如果密度比一个由膨胀率决定的临界值还小，则引力太弱不足以将膨胀停止；如果密度比这临界值大，则引力会在未来的某一时刻将膨胀停止并使宇宙坍缩。

利用多普勒效应，可由测量星系离开我们的速度来确定现在的膨胀速度。这可以非常精确地实现。然而，因为我们只能间接地测量星系的距离，所以它们的距离知道得不很清楚。我们知道的不过是，宇宙在每10年里膨胀5%～10%。然而，我们对现在宇宙的平均密度测量得更不准确。我们如果将银河系和其他星系的所有能看到恒星的质量加起来，甚至按对膨胀率的最低的估值而言，其质量总量还不到用以阻止膨胀的临界值的1%。然而，在我们以及其他星系里应该包含大量的“暗物质”，那是我们不能直接看到的，但由于它的引力对星系中恒星轨道的影响，我们知道它必定存在。此外人们发现，大多数星系是成团的。我们能类似地推断，由其对星系运动的效应，在这些成团的星系之间还存在更多的暗物质。将所有这些暗物质加在一起，我们仍只能获得为停止膨胀必需的密度的十分之一左右。然而，我们不能排除这样的可能性，可能还有我们尚未探测到的其他的物质形式，它们几乎均匀地分布于整个宇宙中，它仍可能使得宇宙的平均密度达到停止膨胀所必需的临界值。所以，现在的证据暗示，宇宙可能会永远地膨胀下去。但是，所有我们能真正肯定的是，既然它已经至少膨胀了100亿年，即便宇宙将要坍缩，至少要再过这么久才有可能。这不应使我们过度忧虑——到那时候，除非我们已到太阳系以外开拓了殖民地，否则人类早就随着太阳的消灭而死亡殆尽！

所有的弗里德曼解都具有一个特点，即在过去的某一时刻（约100亿至200亿年之前）邻近星系之间的距离一定为零。在这被我们称之为大爆炸的那一时刻，宇宙的密度和时空曲率都是无限大。因为数学不能真正地处理无限大的数，这意味着，广义相对论（弗里德曼解以此为基础）预言，在宇宙中存在一点，在该处理论本身崩溃。这样的点正是数学中称为奇点的一个例子。事实上，我们所有的科学理论都是基于时空是光滑的和几乎平坦的基础上表述的，所以它们在时空曲率为无限大的大爆炸奇点处崩溃。这意味着，即使在大爆炸前存在事件，人们也不能用它们去确定其后所要发生的事件，因为可预见性在大爆炸处崩溃了。



相应地，如果——事实也正是如此——我们只知道在大爆炸后发生的事件，我们就不能确定在这之前发生什么。就我们而言，大爆炸之前的事件不能有后果，所以并不构成我们宇宙的科学模型的一部分。因此，我们应将它们从模型中割除掉，并宣称时间是从大爆炸开始的。很多人不喜欢时间有个开端的观念，可能是因为它略带有神的干涉的味道。（另一方面，天主教会抓住了大爆炸模型，并在1951年正式宣告，它和《圣经》相和谐。）因此，人们多次企图避免曾经存在过大爆炸的这一结论。所谓的稳态理论得到过最广泛的支持。这是由纳粹占领的奥地利来的两个难民——赫曼·邦迪和托马斯·高尔德，以及一个在战时和他们一道从事雷达研制的英国人——弗雷德·霍伊尔于1948年共同提出的。其想法是，当星系相互离开时，由正在连续产生的新物质在它们中的间隙不断地形成新的星系（图3.11）。因此，在空间的所有点以及在所有的时间，宇宙看起来在大致上是相同的。稳态理论需要对广义相对论进行修正，使之允许物质的连续生成，但是有关的产生率是如此之低（大约每年每立方千米一个粒子），低到不与实验相冲突。在第一章叙述的意义上，这是一个好的科学理论：它非常简单，并做出确定的预言可让观察者检验。其中一个预言是，我们无论在宇宙的何时何地看给定的空

间体积内星系或类似物体的数目必须一样。20世纪50年代晚期和60年代早期，由马丁·赖尔（他在战时也和邦迪、高尔德以及霍伊尔共事，作雷达研究）领导的一个天文学家小组在剑桥对从外空间来的射电源进行了普查。这个剑桥小组指出，这些射电源的大多数必须位于我们星系之外（它们中的许多确实可被认证与其他星系相关），并且存在的弱源比强源多得多。他们将弱源解释为较远的源，强源为较近的源。结果发现，单位空间体积内普通的源似乎在近处比远处稀少。这可能表明，我们处于宇宙的一个巨大区域的中心，这里的源比其他地方稀少。另外的一个解释是，宇宙在射电波向我们出发的过去的那一时刻具有比现在更密集的源。任何一种解释都和稳态理论相矛盾。此外，1965年彭齐亚斯和威尔逊的微波背景辐射的发现还指出，宇宙在过去必定密集得多。因此必须抛弃稳态理论。



从左至右：稳态理论的提出者弗雷德·霍伊尔、托马斯·高尔德和赫曼·邦迪。后来的观测并不支持该理论尽管如此，霍伊尔相信这些观测被解释错了并且继续坚持。

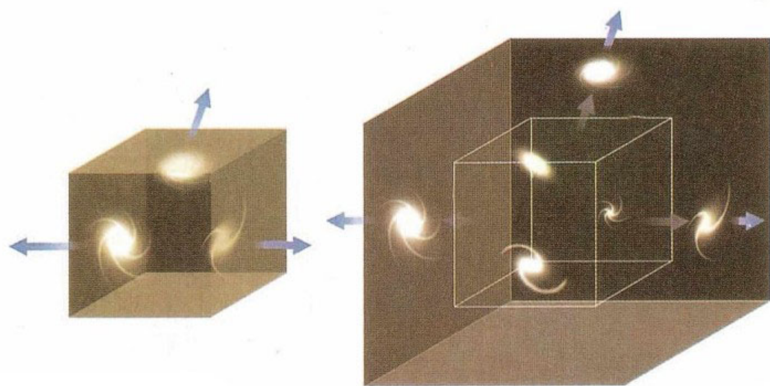
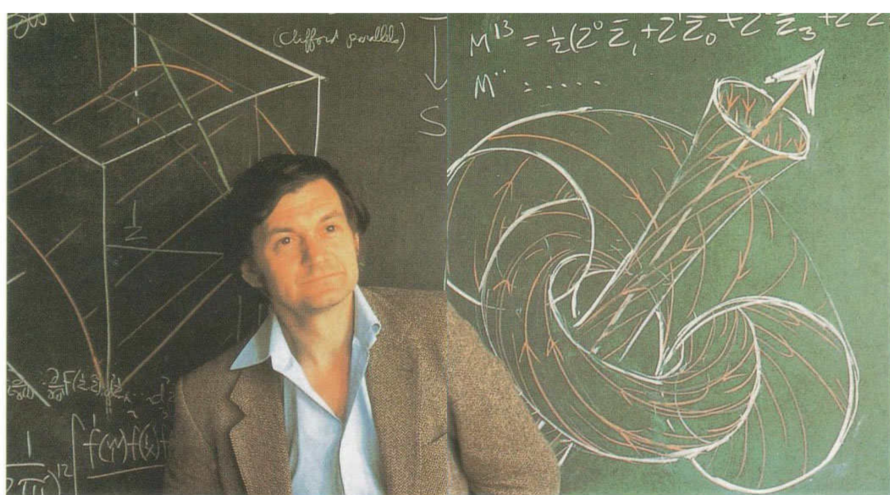


图3.11　随着宇宙膨胀，新的星系继续形成，以维持其密度。

1963年，两位苏联科学家欧格尼·利弗席兹和艾萨克·哈拉尼可夫做了另外的尝试，设法避免存在大爆炸并因此引起时间起点的问题。他们提出，大爆炸可能只是弗里德曼模型的特性，这个模型毕竟只是真实宇宙的近似。也许，在所有大体类似实在宇宙的模型中，只有弗里德曼模型包含大爆炸奇点。在弗里德曼模型中，所有星系都直接相互离开——所以一点都不奇怪，在过去的某一时刻它们必须在同一处。然而，在实际的宇宙中，星系不仅仅直接相互离开，它们还有一些斜向速度。所以，在实际上它们从来没必要恰好在同一处，只不过非常靠近而已。也许，现在膨胀着的宇宙不是来自于大爆炸奇点，而是来自于更早期的收缩；当宇宙坍缩时，其中的粒子可以不都碰撞，而是相互离得很近飞过然后又离开，产生了现在的宇宙膨胀。那么何以得知这实际的宇宙是否从大爆炸起始的呢？利弗席兹和哈拉尼可夫所做的，是去研究大体和弗里德曼模型相像的宇宙模型，但是考虑了实际宇宙中的星系的不规则性和杂乱速度。他们指出，即使星系不再总是直接相互离开，这样的模型也可以从一个大爆炸开始。但是他们宣称，这只在某些例外的模型中仍然可能发生，那里所有星系都以正确的方式运动。他们论证道，似乎没有大爆炸奇点的类弗里德曼模型比有此奇点的模型多无限多倍，所以我们的结论应该是，在实际上并没有过大爆炸。然而，他们后来意识到，存在更为广泛的具有奇点的类弗里德曼模型，那里的星系不必以任何特别的方式运动。所以，他们在1970年撤回了自己的主张。



理论数学家罗杰·彭罗斯在1980年拍摄于牛津。

利弗席兹和哈拉尼可夫的工作是有价值的。因为它显示了，如果广义相对论是正确的，宇宙可以有过奇点，一个大爆炸。然而，它没有解决关键的问题：广义相对论是否预言我们的宇宙一定有过大爆炸或时间的开端？对于这个问题，英国数学家兼物理学家罗杰·彭罗斯在1965年以完全不同的手段给出了回答。利用广义相对论中光锥行为的方式以及引力总是吸引这个事实，他证明了，坍缩的恒星在自己的引力作用下陷入到一个区域之中，其表面最终缩小到零。并且由于这区域的表面缩小到零，它的体积也应如此。恒星中的所有物质将被压缩到一个零体积的区域里，所以物质的密度和时空的曲率变成无限大。换言之，人们得到了一个奇点，它被包含在一个叫做黑洞的时空区域中（图3.12A）。

彭罗斯的结果乍看起来只适用于恒星；它并没有涉及任何关于整个宇宙的过去是否有个大爆炸奇点的问题。然而，当彭罗斯在创作他的定理之时，我还是一名研究生，正在尽力寻求一个完成博士论文的问题。两年之前我即被诊断得了肌萎缩性（脊椎）侧索硬化症，通常又称为卢伽雷病或运动神经细胞病，并且得知只有一两年可活了。在这种情况下，看来没有很多必要攻读博士学位了——我预料不能活那么久。然而两年过去了，我没有糟到那种程度。事实上，我的事情还进行得相当好，还和一个非常好的姑娘简·瓦尔德订婚了。但是为了结婚，我需要一份工作；为了得到工作，我需要一个博士学位。

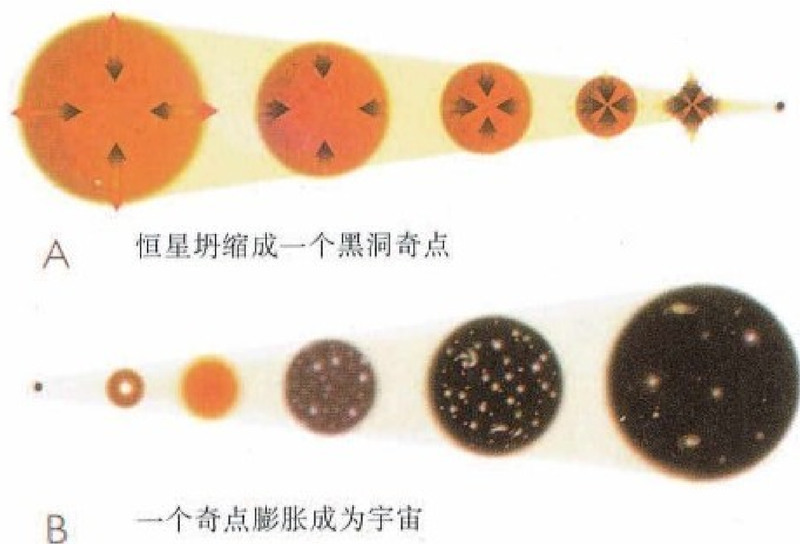


图3.12　从大爆炸来的宇宙膨胀正如一个恒星坍缩成一个黑洞奇点的时间反演

1965年，我读到彭罗斯关于任何物体受到引力坍缩必定最终形成一个奇点的定理我很快意识到，如果人们将彭罗斯定理中的时间方向颠倒以使坍缩变成膨胀，假定现在宇宙在大尺度上大体类似弗里德曼模型，这定理的条件仍然成立。彭罗斯定理已经指出，任何坍缩星体必定终结于一个奇点；其时间颠倒的论证则是，任何类弗里德曼膨胀宇宙一定是从一个奇点开始。为了技巧上的原因，彭罗斯定理需要宇宙在空间上是无限的条件。于是，在实质上，我能用它来证明，只有当宇宙膨胀得快到足以避免重新坍缩时（因为只有那些弗里德曼模型才是空间无限的），才一定存在一个奇点。

在随后的几年中，我发展了新的数学技巧，从用于证明奇点一定发生的定理中除去了这个和其他技术上的条件。最后的结果是1970年彭罗斯和我的合作论文。那篇论文最后证明了，假定广义相对论是正确的，而且宇宙包含着我们观测到的这么多物质，则过去一定有过一个大爆炸奇点。我们的工作遭遇到许多的反对，部分来自苏联人，由于他们对马克思主义科学决定论的信仰；另一部分来自某些人，他们认为整个奇点的观念是不一致的，并糟蹋了爱因斯坦理论的完美。然而，人实在不能辩赢数学定理。所以我们的工作最终被广泛接受，现在几乎每个人都假定宇宙是从一个大爆炸奇点起始的。颇具讽刺意味的是，现在我改变了想法，试图去说服其他物理学家，事实上在宇宙的开端并没有奇点——

正如我们将要看到的，一旦考虑了量子效应，奇点就会消失。



史蒂芬·霍金1962年毕业于牛津。

我们在这一章已经看到，在不到半个世纪的时间里，人们几千年来形成的宇宙观被转变了。哈勃关于宇宙膨胀的发现，以及关于我们自己的行星在茫茫宇宙中微不足道的认识，只不过是起点而已。随着实验和理论证据的积累，人们越来越清楚地认识到，宇宙在时间上必须有个开端。直到1970年，在爱因斯坦广义相对论的基础上，彭罗斯和我才证明了它。这个证明显示，广义相对论只是一个不完全的理论，它不能告诉我们宇宙是如何开始的，因为它预言，所有包括它自己在内的物理理论都在宇宙的开端失效。然而，广义相对论宣称自己只是一个部分理论，所以奇点定理真正显示的是，在极早期宇宙中一定有过一个时刻，那时宇宙是如此之小，人们不能再不理会20世纪另一个伟大的部分理论，量子力学的小尺度效应。20世纪70年代初期，我们被迫从极其巨大范围的

理论理解宇宙转变到从极其微小范围的理论理解宇宙。在我们努力将这两个部分理论结合成一个单一的量子引力论之前，下面首先描述量子力学这个理论。

第四章　不确定性原理

科学理论，尤其是牛顿引力论的成功，使得法国科学家拉普拉斯侯爵在19世纪初论断，宇宙是完全决定论的。拉普拉斯提出，应该存在一族科学定律，只要我们知道宇宙在某一时刻的完全的状态，我们便能预言宇宙中将会发生的任一事件。例如，假定我们知道某一个时刻的太阳和行星的位置和速度，则可用牛顿定律计算出在任何其他时刻的太阳系的状态。这种情形下的决定论是显而易见的，但拉普拉斯走得更远，他假定存在着某些类似定律，它们制约其他所有事物，包括人类的行为。

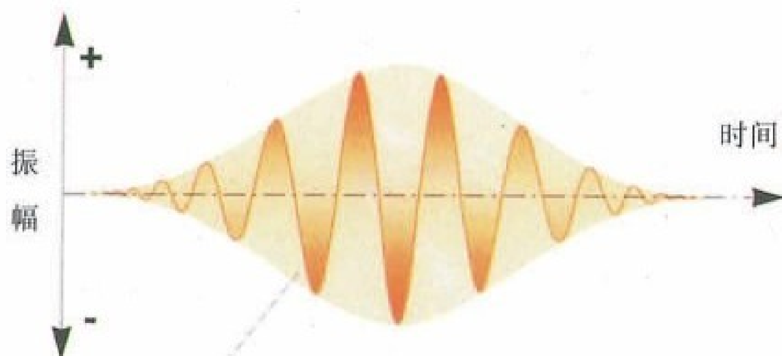


彼埃尔·西蒙·拉普拉斯（1749～1827）。

很多人强烈地抵制这种科学决定论的教义，他们感到这侵犯了上帝干涉世界的自由。但直到20世纪初，这种观念仍被认为是科学的标准假

定。英国科学家瑞利勋爵和詹姆士·金斯爵士做的一个计算，它是这种信念必须被抛弃的一个最初的征兆。他们指出一个热的物体，例如恒星，一定以无限大的速率辐射出能量。按照当时人们相信的定律，一个热体必须在所有的频率同等地发出电磁波（诸如射电波、可见光或X射线）。例如，一个热体在每秒1万亿次波动至2万亿次波动频率之间的波发出和在每秒2万亿次波动至3万亿次波动频率之间的波同样的能量。而既然每秒波动数是无限的，这意味着辐射出的总能量也必须是无限的。

具有低能量的
低频量子



波包

具有高能量
的高频量子

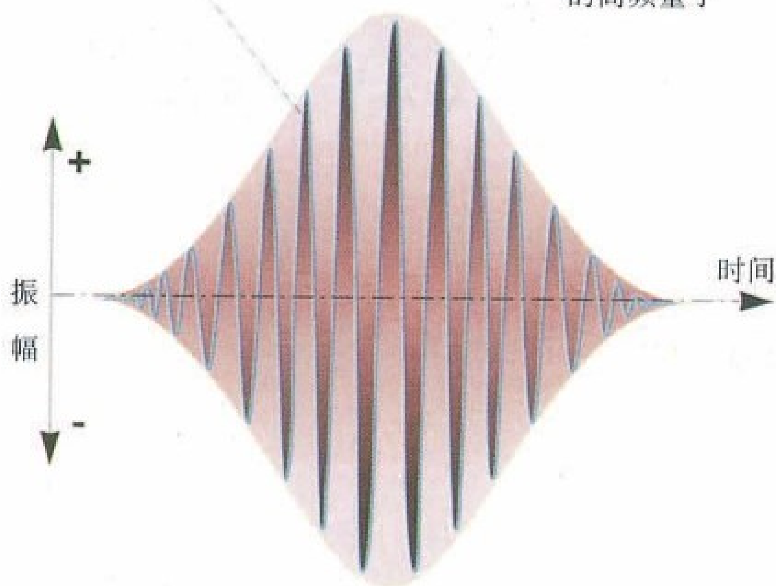


图4.1　马克斯·普朗克假设，光只能以波包或量子的形式出现，它是具有与其频率成比例的能量的一串波。

为了避免这显然荒谬的结果，德国科学家马克斯·普朗克在1900年提出，光波、X射线和其他波不能以任意的速率辐射，而只能以某种称为量子的波包发射（图4.1）。此外，每个量子具有确定的能量，波的频率越高，其能量越大。这样，在足够高的频率下，辐射单个量子所需要的能量比所能得到的还要多。因此，在高频下的辐射减少了，这样物体丧失能量的速率就变成有限的了。

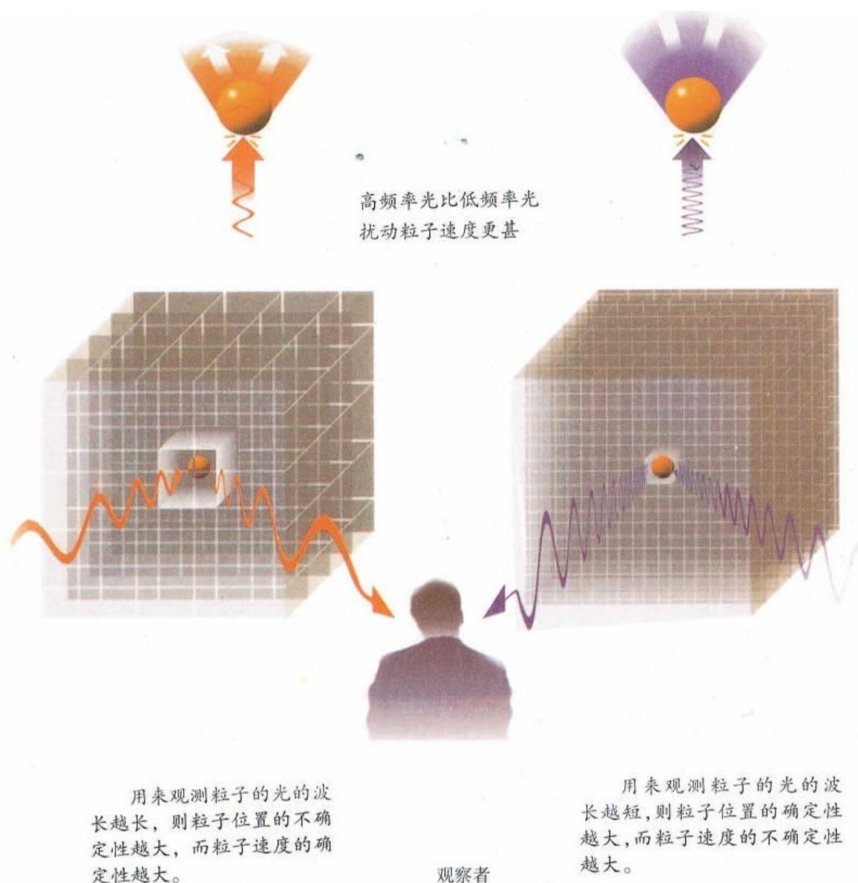


图4.2



图4.3



威纳·海森伯（1901-1976）以他的不确定性原理而为大家所熟知：其原理是讲不可能同时精确地确定一个粒子的位置和速度。在上面的图4.3中阐释这个原理的方程中的纪念币上刻有马克斯·普朗克的头像。

量子假设可以非常成功地解释观测到的热体的辐射发射率，但直到1926年另一位德国科学家威纳·海森伯提出著名的不确定性原理之后，人们才意识到它对决定论的含义。为了预言一个粒子未来的位置和速度，人们必须能够准确地测量它现在的位置和速度。显而易见的办法是将光照到这粒子上（图4.2）。一部分光波被此粒子散射开来，由此指明它的位置。然而，人们不可能将粒子的位置确定到比光的两个波峰之间距离更小的程度，所以为了精确测量粒子的位置，必须用短波长的光。可是，由普朗克的量子假设，人们不能用任意小量的光；人们至少要用一个光量子。这量子会扰动这粒子，并以一种不能预见的方式改变粒子的速度。此外，位置测量得越准确，所需的波长就越短，单个量子的能量就越大，这样粒子的速度就被扰动得越厉害。换言之，你对粒子的位置测量得越准确，你对速度的测量就越不准确，反之亦然。海森伯指出，粒子位置的不确定性乘以粒子质量再乘以速度的不确定性不能小于一个确定量，该确定量称为普朗克常量（图4.3）。并且，这个极限既不依赖于测量粒子位置和速度的方法，也不依赖于粒子的种类。海森伯不确定性原理是世界的一个基本的不可回避的性质。

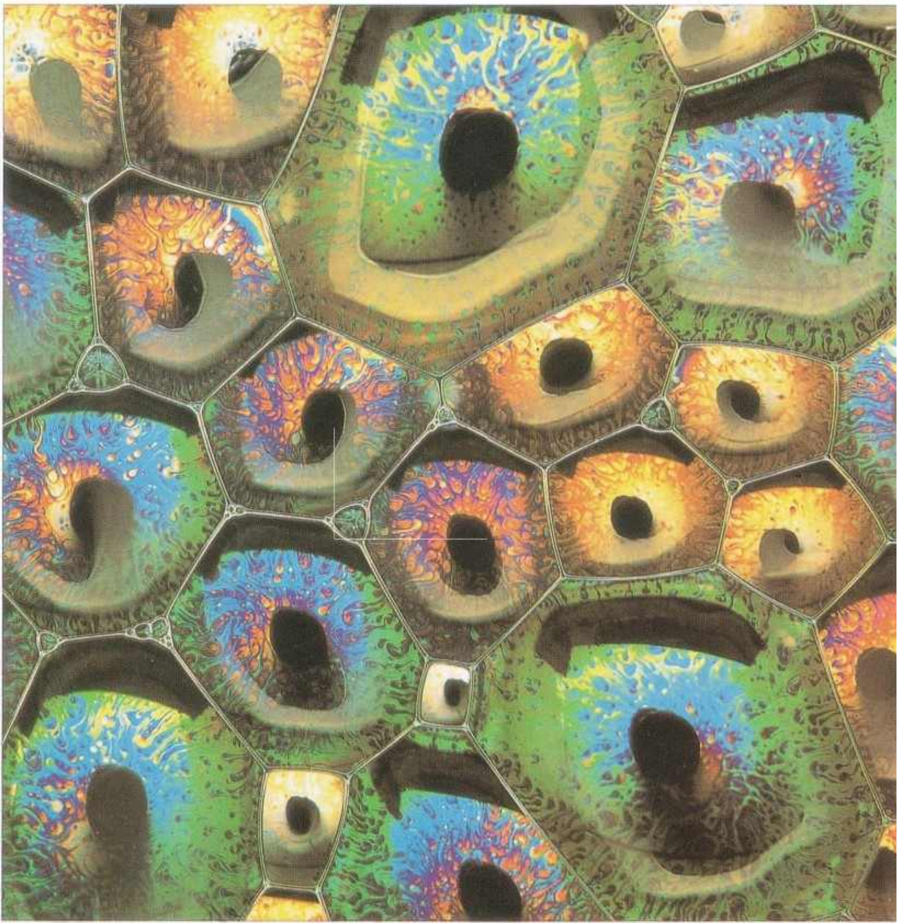
不确定性原理对我们的世界观有非常深远的影响。甚至到了70多年之后，许多哲学家还不能充分鉴赏它，它仍然是许多争议的主题。不确定性原理使拉普拉斯的科学理论，即一个完全确定性的宇宙模型的梦想寿终正寝：如果人们甚至不能准确地测量宇宙现在的状态，那么就肯定不能准确地预言将来的事件！我们仍然可以想象，对于一些超自然的生物，存在一族完全的决定事件的定律，这些生物能够不干扰宇宙地观测宇宙现在的状态。然而，对于我们这些芸芸众生而言，这样的宇宙模型并没有太多的兴趣。看来，最好是采用称为奥铿剃刀的经济原理，将理论中不能被观测到的所有特征都割除掉。20世纪20年代，在不确定性原理的基础上，海森伯、厄文·薛定谔和保尔·狄拉克运用这种手段将力学重新表述成称为量子力学的新理论。在此理论中，粒子不再分别有很好定义的而又不能被观测的位置和速度。取而代之，粒子具有位置和速度的一个结合物，即量子态。



厄文·薛定谔（1887-1961）

一般而言，量子力学并不对一次观测确定地预言一个单独的结果。取而代之，它预言一组可能发生的不同结果，并告诉我们每个结果出现的概率。也就是说，如果我们对大量类似的系统作同样的测量，每一个系统以同样的方式起始，我们将会找到测量的结果为A出现一定的次数，为B出现另一不同的次数，等等。人们可以预言结果为A或B的出现的次数的近似值，但不能对个别测量的特定结果作出预言。因而量子力学把非预见性或随机性的不可避免因素引进了科学。尽管爱因斯坦在发展这些观念时起了很大作用，但他非常强烈地反对这些。他之所以得到诺贝尔奖就是因为他对量子理论的贡献。即使这样，他也从不接受宇宙受机缘控制的观点；他的情绪可以用他著名的断言来表达：“上帝不掷骰子。”然而，其他大多数科学家愿意接受量子力学，因为它和实验符合得很完美。它的的确确成为一个极其成功的理论，并成为几乎所有现代科学技术的基础。它制约着晶体管和集成电路的行为，而这些正是电子设备诸如电视、计算机的基本元件。它还是现代化学和生物学的基础。物理科学未让量子力学适当结合进去的仅有领域是引力和宇宙的大尺度结构。

虽然光是由波组成的，普朗克的量子假设告诉我们，在某些方面，它的行为似乎显现出它是由粒子组成的——它只能以波包或量子的形式发射或吸收。同样地，海森伯的不确定性原理意味着，粒子在某些方面的行为像波一样它们没有确定的位置，而是被“抹平”成一定的几率分布。量子力学的理论是基于一个全新的数学基础之上，不再按照粒子和波来描述实际的世界；而只不过利用这些术语，来描述对世界的观测而已。这样，在量子力学中存在着波和粒子的二重性：为了某些目的将粒子考虑成波是有用的，而为了其他目的最好将波考虑成粒子。这导致一个很重要的结果，人们可以观察到两束波或粒子之间的所谓的干涉。那也就是，一束波的波峰可以和另一束波的波谷相重合。这两束波就相互抵消（图4.4），而不像人们预料的那样，叠加在一起形成更强的波（图4.5）。一个光干涉的熟知例子是，肥皂泡上经常能看到颜色。这是因为从形成泡的很薄的水膜的两边的光反射引起的。白光由所有不同波长或颜色的光波组成，在从水膜一边反射回来的具有一定波长的波的波峰和从另一边反射的波谷相重合时，对应于此波长的颜色就不在反射光中出现，所以反射光就显得五彩缤纷。



肥皂泡。在泡泡中看到的绚丽无比的颜色是起因于从水的薄膜两边反射来的光的干涉模式。

异相

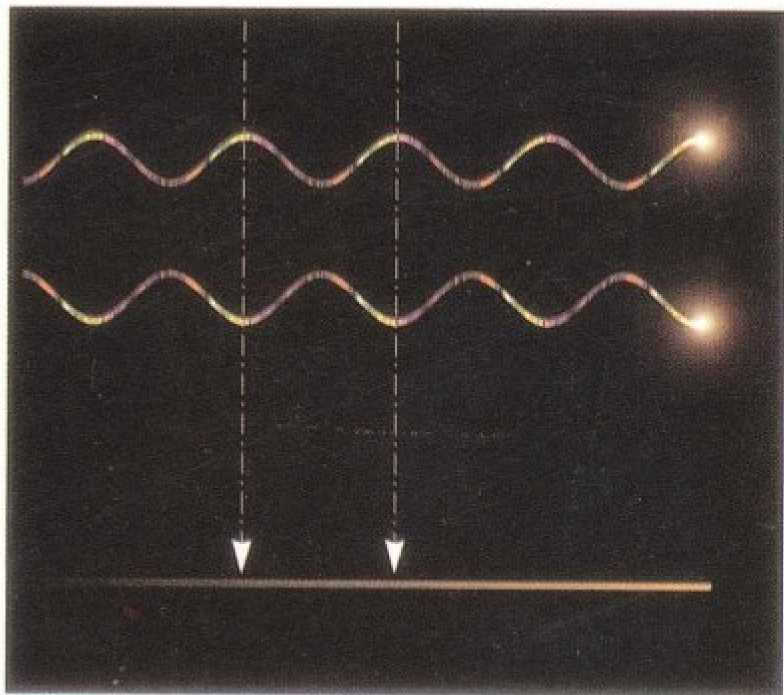


图4.4　当波动异相时其波峰和波谷相互抵消。

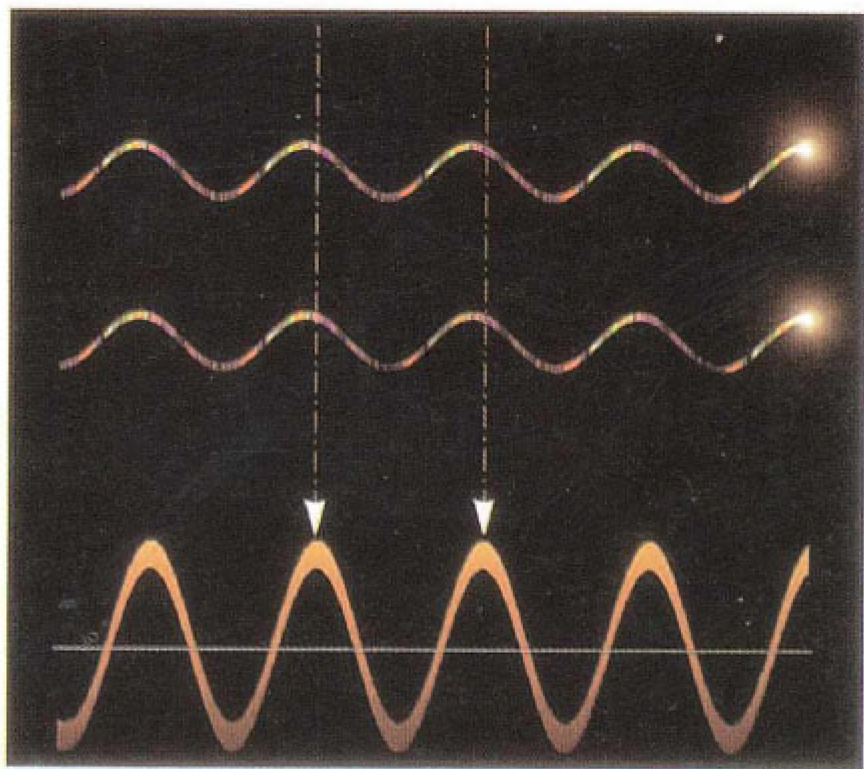


图4.5　当波动同相时其波峰和波谷分别重合并相互增强。

由于量子力学引进的二重性，粒子也会产生干涉。所谓的双缝实验即是著名的例子（图4.6）。考虑一个带有两个平行狭缝的隔板，在它的一边放上一个特定颜色（即特定波长）的光源。大部分光都射在隔板上，但是一小部分光通过这两条缝。现在假定将一个屏幕放到隔板的另一边，屏幕上的任何一点都能接收到两条狭缝来的波。然而，一般来说，光从光源通过这两条狭缝传到屏幕上的距离是不同的。这表明，从狭缝来的光到达屏幕之时不再是相互同相的：有些地方波相互抵消，其他地方它们相互加强，结果形成有亮暗条纹的特征花样。

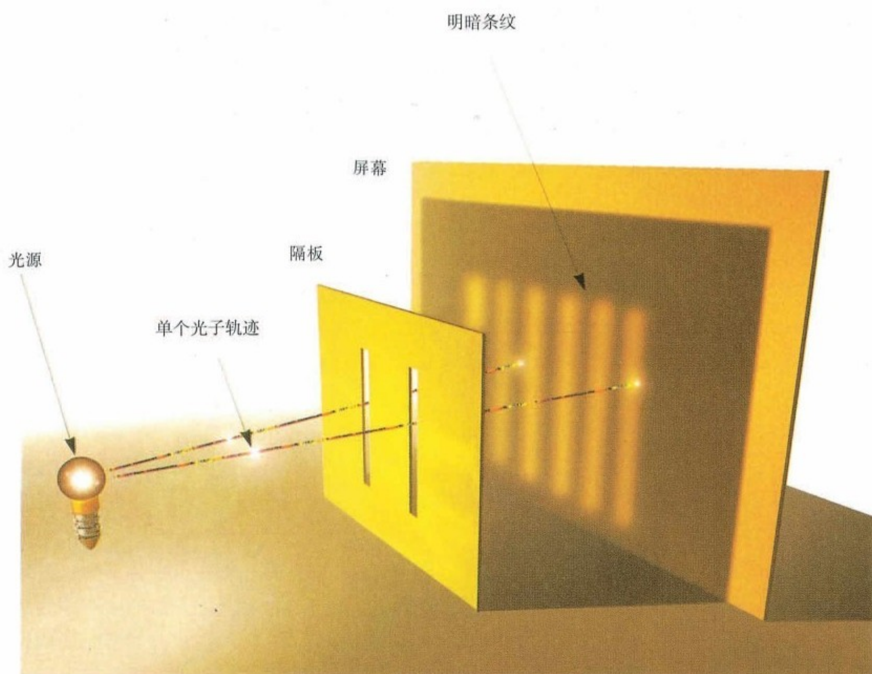
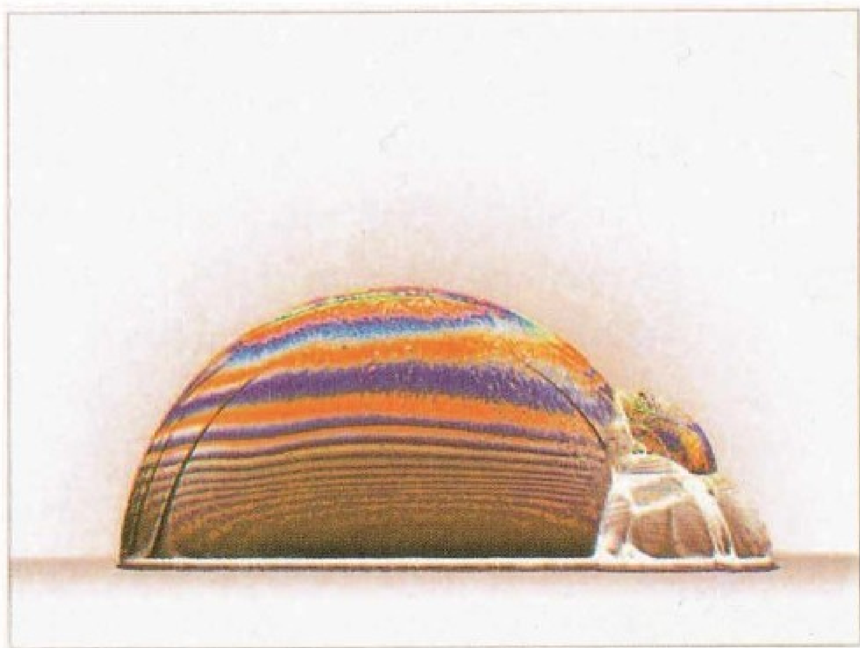


图4.6　双缝产生明暗条纹。其原因是从双缝来的波在屏幕的不同部分相互叠加或者相互抵消。利用粒子，譬如电子得到类似的条纹，证明它们的行为和波相似。

非常令人惊异的是，如果将光源换成粒子源，譬如具有一定速度（这表明其对应的波有确定的波长）的电子束，人们得到完全同样类型的条纹。这显得更为古怪，因为如果只有一条裂缝，则得不到任何条纹，只不过是电子通过这屏幕的均匀分布。人们因此可能会想到，另开一条缝只不过是打到屏幕上每一点的电子数目增加而已。但是，实际上由于干涉，在某些地方反而减少了。如果在一个时刻只有一个电子被发出通过狭缝，人们会以为，每个电子只穿过这条或那条缝，这样它的行为正如只存在通过的那条缝一样——屏幕会给出一个均匀的分布。然而，实际上即便每次一个地发出电子，条纹仍然出现。因此，每个电子准是在同一时刻通过两条小缝！

粒子间的干涉现象，对于我们理解原子的结构至为关键，后者是作为化学和生物的基元，以及由之组成我们和我们周围所有一切的构件。在本世纪（即20世纪——编者注）初，人们认为原子和行星围绕着太阳公转相当类似，电子（带负电荷的粒子）围绕着带正电荷的中心的核公转。人们以为正电荷和负电荷之间的吸引力维持电子的轨道，正如同行星和太阳之间的万有引力维持行星的轨道一样（图4.7-2）。麻烦在于，

在量子力学之前，力学和电学的定律预言，电子会失去能量并以螺旋线的轨道落向并最终撞击到核上去。这表明原子（实际上所有的物质）都会很快地坍缩成一种非常高密度的状态。丹麦科学家尼尔斯·玻尔在1913年，为此问题找到了部分的解答。他提出，也许电子不能在离中心核任意远的地方，而只能在一些指定的距离处公转。如果我们再假定，只有一个或两个电子能在这些距离上的任一轨道上公转，因为电子除了充满最小距离和最小能量的轨道外，不能进一步向里螺旋靠近，这就解决了原子坍缩的问题。



对于最简单的原子氢原子，这个模型给出了相当好的解释，这里只有一个电子围绕着原子核运动。但人们不清楚如何将其推广到更复杂的原子上去。并且，可允许轨道有限集合的思想似乎显得非常任意。量子力学的新理论解决了这一困难。原来一个围绕核运动的电子可被认为是一个波，其波长依赖于其速度。对于一定的轨道，轨道的长度对应于整数（而不是分数）倍电子的波长。对于这些轨道，每绕一圈波峰总在同一位置，所以波就相互叠加；这些轨道对应于玻尔的可允许的轨道。然而，对于那些长度不为波长整数倍的轨道，当电子围绕着运动时，每个波峰将最终被波谷抵消；这些轨道是不允许的。

美国科学家理查德·费恩曼引入的所谓对历史求和（即路径积分）的

方法是一个摹写波粒二象性的好方法。在这方法中，粒子不像在经典亦即非量子理论中那样，在时空中只有一个历史或者一个路径。相反，假定粒子从A到B可走所有可能的轨道（图4.8）。和每个路径相关存在一对数：一个数表示波的幅度；另一个表示在周期循环中的位置（即相位）。从A走到B的几率是将所有路径的波加起来，一般说来，如果比较一种邻近的路径，相位或周期循环中的位置会差别很大。这意味着，相应于这些轨道的波几乎都相互抵消了。然而，对于某些邻近路径的集合，它们之间的相位变化不大，这些路径的波不会抵消。这种路径对应于玻尔的允许轨道。

利用这些思想，以具体的数学形式，可以相对直截了当地计算更复杂的原子甚至分子的允许轨道。分子是由一些原子因轨道上的电子围绕不止一个原子核运动而束缚在一起形成的，由于分子的结构，以及它们之间的反应构成了化学和生物的基础，除了受不确定性原理限制之外，在原则上，量子力学允许我们预言围绕我们的几乎一切东西。（然而，实际上对一个包含稍多电子的系统需要的计算如此之复杂，以至于使我们做不到。）





尼尔斯·玻尔（1885～1962）。

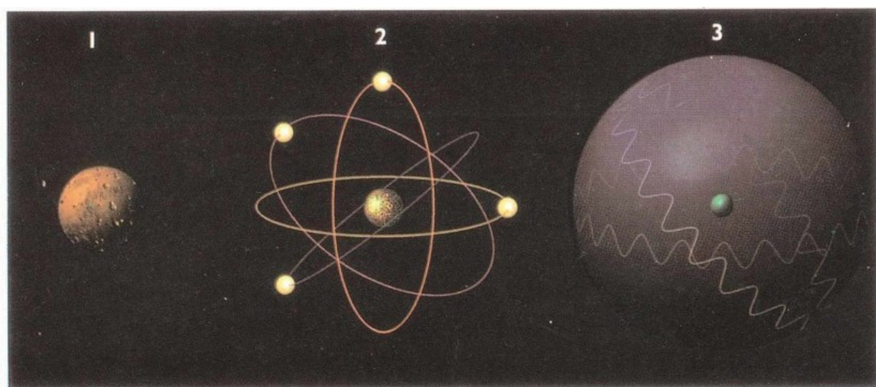


图4.7　原子论的演化，从希腊哲学家德谟克里特的颗粒状原子（1），通过卢瑟福的电子绕核公转模型（2）至薛定谔的原子的量子力学模型（3）。

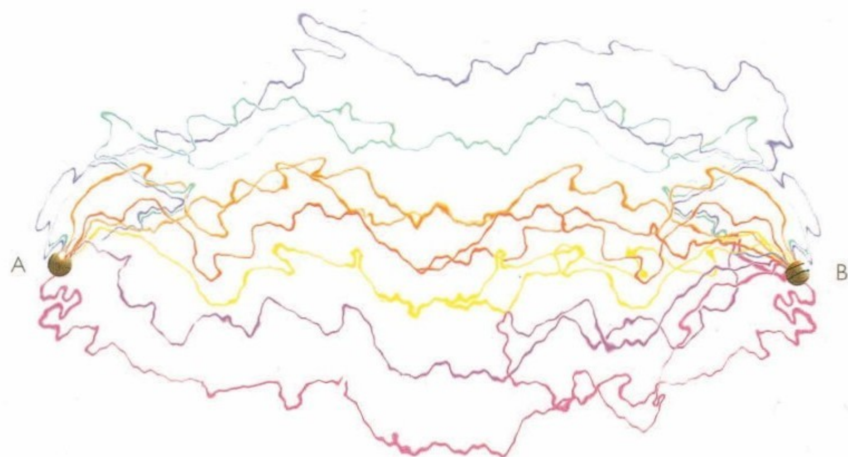


图4.8　在理查德·费恩曼的历史求和理论中，在时空中的粒子从A到B可通过所有可能的路径。

看来，爱因斯坦广义相对论制约了宇宙的大尺度结构。它是所谓的经典理论；那就是说，它没有到考虑量子力学的不确定性原理，而为了和其他理论一致这是必需的。因为我们通常检验到的引力场非常弱，所以这个理论并没导致和观测的偏离，然而，早先讨论的奇点定理指出，至少在两种情形下引力场会变得非常强：黑洞和大爆炸。在这样强的场里，量子力学效应应该是非常重要的。因此，在某种意义上，经典广义相对论由于预言无限大密度的点而预示了自身的垮台，正如同经典（也就是非量子）力学由于隐含着原子必须坍缩成无限的密度，而预言自身的垮台一样。我们还没有一个完备的协调的统一广义相对论和量子力学的理论，但是我们已知这个理论所应有的一系列特征。在以下几章我们将描述这些对黑洞和大爆炸的效应。然而，此刻我们先转去介绍人类新近的尝试，他们试图将对自然界中其他力的理解合并成一个单独的统一的量子理论。

第五章　基本粒子和自然的力

亚里士多德相信宇宙中的所有物质由四种基本元素即土、气、火和水组成。有两种力作用在这些元素上：引力，这是指土和水往下沉的趋势；浮力，这是指气和火往上升的倾向。将宇宙的内容分割成物质和力的这种做法一直沿袭至今。

亚里士多德相信物质是连续的，也就是说，人们可以将物质无限制地分割成越来越小的小块，即人们永远不可能得到一个不可再分割下去的最小颗粒。然而几个希腊人，例如德谟克里特，则坚持物质具有固有的颗粒性，而且认为每一件东西都是由大量的各种不同类型的原子组成（原子在希腊文中的意义是“不可分的”）。争论一直持续了几个世纪，任何一方都没有任何实际的证据。但是1803年英国的化学家兼物理学家约翰·道尔顿指出，化合物总是以一定的比例结合而成的，这一事实可以用由原子聚合一起形成称做分子的个体来解释。然而，直到本世纪初这两种学派的争论才以原子论者的胜利而告终，爱因斯坦提供了其中一个重要的物理学证据。1905年，在他关于狭义相对论的著名论文发表前的几周，他在发表的另一篇文章里指出，所谓的布朗运动——悬浮在液体中尘埃小颗粒的无规则随机运动——可以解释为液体原子和灰尘粒子碰撞的效应（图5.1）。

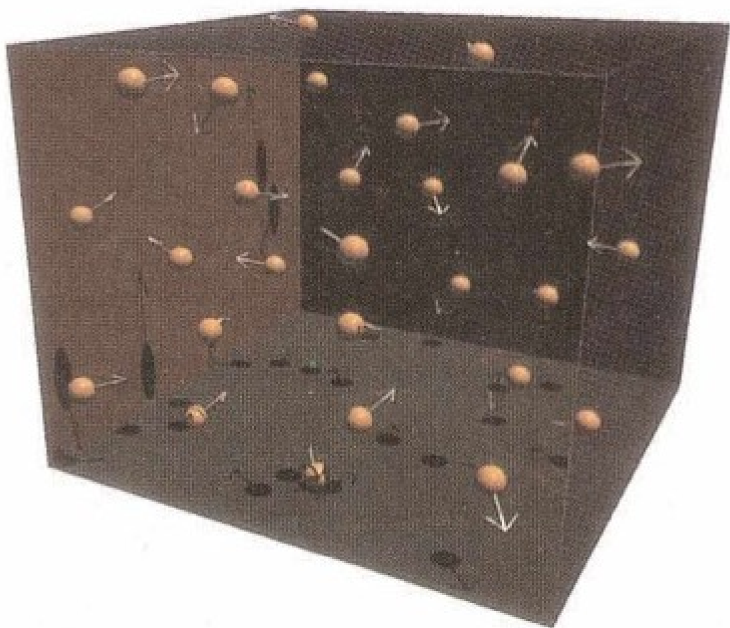


图5.1　利用一台显微镜，可以看到在水中悬浮的尘埃粒子以非常不规则的随机的方式运动。爱因斯坦利用这一“布朗运动”来显示，水是由原子组成的。



约瑟夫·约翰·汤姆孙（1856～1940）。



恩斯特·卢瑟福（1871～1937），这是他在麦基尔大学时拍摄的照片。

当时就有人怀疑，这些原子终究不是不可分割的。几年前，一位剑桥大学三一学院的研究员J·汤姆孙演示了一种称为电子的物质粒子存在的证据。电子具有的质量比最轻原子的一千分之一还小。他使用了一种和现代电视显像管相当类似的装置：由一根红热的金属细丝发射出电子，由于它们带负电荷，可用电场将其朝一个涂磷光物质的屏幕加速。电子一打到屏幕上就会产生一束束的闪光。人们很快即意识到，这些电子一定是从原子本身里出来的。新西兰物理学家恩斯特·卢瑟福在1911年最后证明了物质的原子确实具有内部结构：它们是由一个极其微小的带正电荷的核以及围绕着它公转的一些电子组成。他分析从放射性原子释放出的带正电荷的α粒子和原子碰撞会引起偏转的方式，从而推出这一结论。

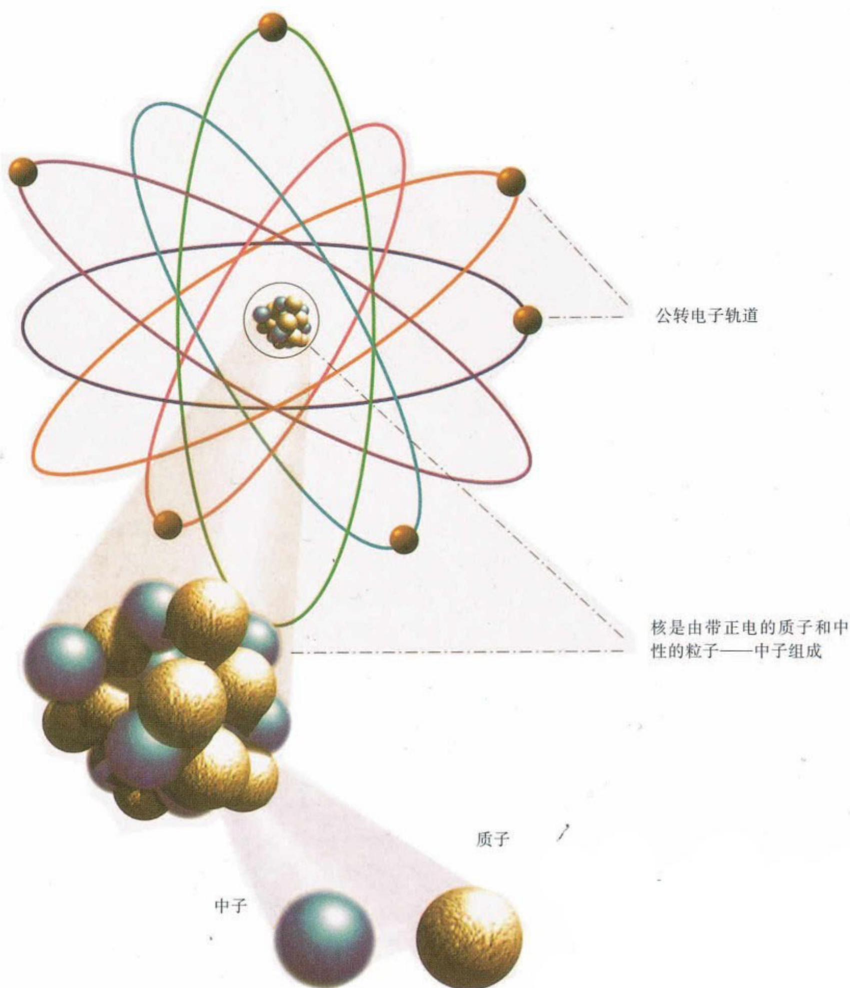


图5.2　卢瑟福-查德威克原子模型，电子绕着由质子和中子构成的微小的密集的核公转。

最初，人们认为原子核是由电子和不同数量的带正电的叫做质子的粒子组成。质子是由希腊文中表达“第一”的词演化而来的，因为质子被认为是组成物质的基本单位。然而，1932年卢瑟福在剑桥的一位同事詹姆斯·查德威克发现，原子核还包含另外称为中子的粒子，中子几乎具有和质子一样大的质量但不带电荷。查德威克因这个发现获得诺贝尔奖，并被选为剑桥龚维尔和基斯学院（我即为该学院的研究员）院长。后来，他因为和其他人不和而辞去院长的职务。一群战后回来的年轻的研究员将许多已占据位置多年的老研究员选掉后，曾有过一场激烈的辩论。这是在我去以前发生的；我在这场争论尾声的1965年才加入该学院，当时另一位获诺贝尔奖的院长奈维尔·莫特爵士也因类似的争论而辞

职。

直到大约30年以前，人们还以为质子和中子是“基本”粒子。但是，质子和另外的质子或电子高速碰撞的实验表明，它们事实上是由更小的粒子构成的。加州理工学院的牟雷·盖尔曼将这些粒子命名为夸克。由于对夸克的研究，他获得1969年的诺贝尔奖。此名字起源于詹姆斯·乔伊斯神秘的引语：“Three quarks for Muster Mark！”夸克这个字应发夸脱的音，但是最后的字母是k而不是t，通常和拉克（云雀）相押韵。



詹姆斯·查德威克爵士（1891～1974）。二战时期英国原子弹计划的负责人，查德威克最著名的发现是中子，并因此获得1935年的诺贝尔奖。

存在有几种不同类型的夸克：有六种“味”，这些味我们分别称之为上、下、奇、粲、底和顶。20世纪60年代起人们就知道前三种夸克，1974年才发现粲夸克，1977年和1995年分别发现底和顶夸克。每种味都带有三种“色”，即红、绿和蓝。（必须强调，这些术语仅仅是标签：夸克比可见光的波长小得多，所以在通常意义下没有任何颜色。这只不过是现代物理学家似乎更富有想象力地命名新粒子和新现象的方式而已——他们不再让自己受限制于希腊文！）一个质子或中子由三个夸克组成，每个夸克各有一种颜色。一个质子包含两个上夸克和一个下夸克；

一个中子包含两个下夸克和一个上夸克（图5.3）。我们可以创生由其他种类的夸克（奇、粲、底和顶）构成的粒子，但所有这些都具有大得多的质量，并非常快地衰变成质子和中子（图5.4和图5.5）。

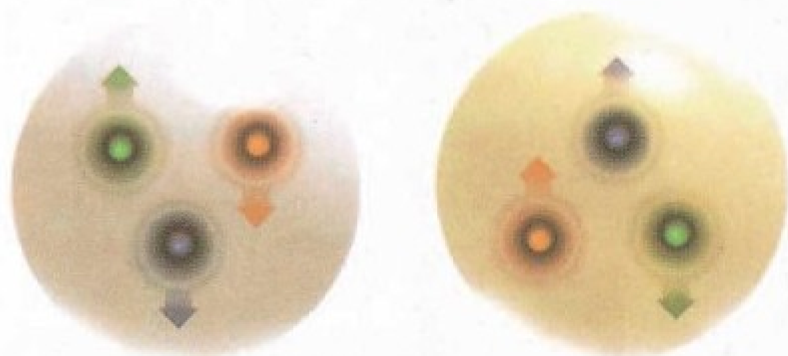
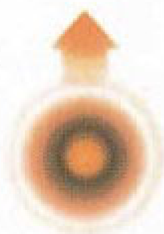
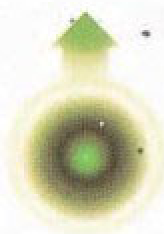


图5.3　中子包含两个具有-1/3电荷的下夸克和一个具有＋2/3电荷的上夸克，其总电荷为0。

现在我们知道，不管是原子还是其中的质子和中子都不是不可分的。问题在于什么是真正的基本粒子——构成世界万物的最基本的构件？由于光波波长比原子的尺度大得多，我们不能期望以通常的方法去“看”一个原子的部分。我们必须用某些波长短得多的东西。正如我们在上一章所看到的，量子力学告诉我们，实际上所有粒子都是波，粒子的能量越高，则其对应的波的波长越短。所以，我们能对这个问题给出的最好的回答，取决于我们装置中的粒子能量有多高，因为这决定了我们能看到的尺度有多小。这些粒子的能量通常用叫做电子伏特的单位来测量。（在汤姆孙的电子实验中，我们看到他用一个电场去加速电子，一个电子从一个伏特的电场所得到的能量即是一个电子伏特。）在19世纪，当人们知道如何去使用的粒子能量只是由化学反应——诸如燃烧——产生的几个电子伏特的低能量时，大家以为原子即是最小的单位。在卢瑟福的实验中，α粒子具有几百万电子伏特的能量。更晚的时代，我们获悉如何使用电磁场给粒子提供首先是几百万，然后是几十亿电子伏特的能量。这样我们知道，30年之前以为是“基本”的粒子，事实上是由更小的粒子组成。如果我们利用更高的能量时，是否会发现这些粒子是由更小的粒子组成的呢？这一定是可能的。但我们确实有一些理论上的原因，相信我们已经拥有，或者说接近拥有自然的终极构件的知识。



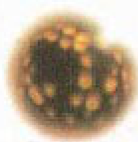


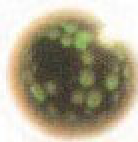
上夸克



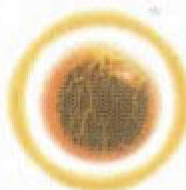


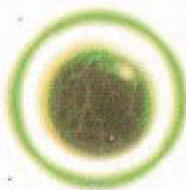
下夸克





奇夸克





粲夸克





底夸克





顶夸克

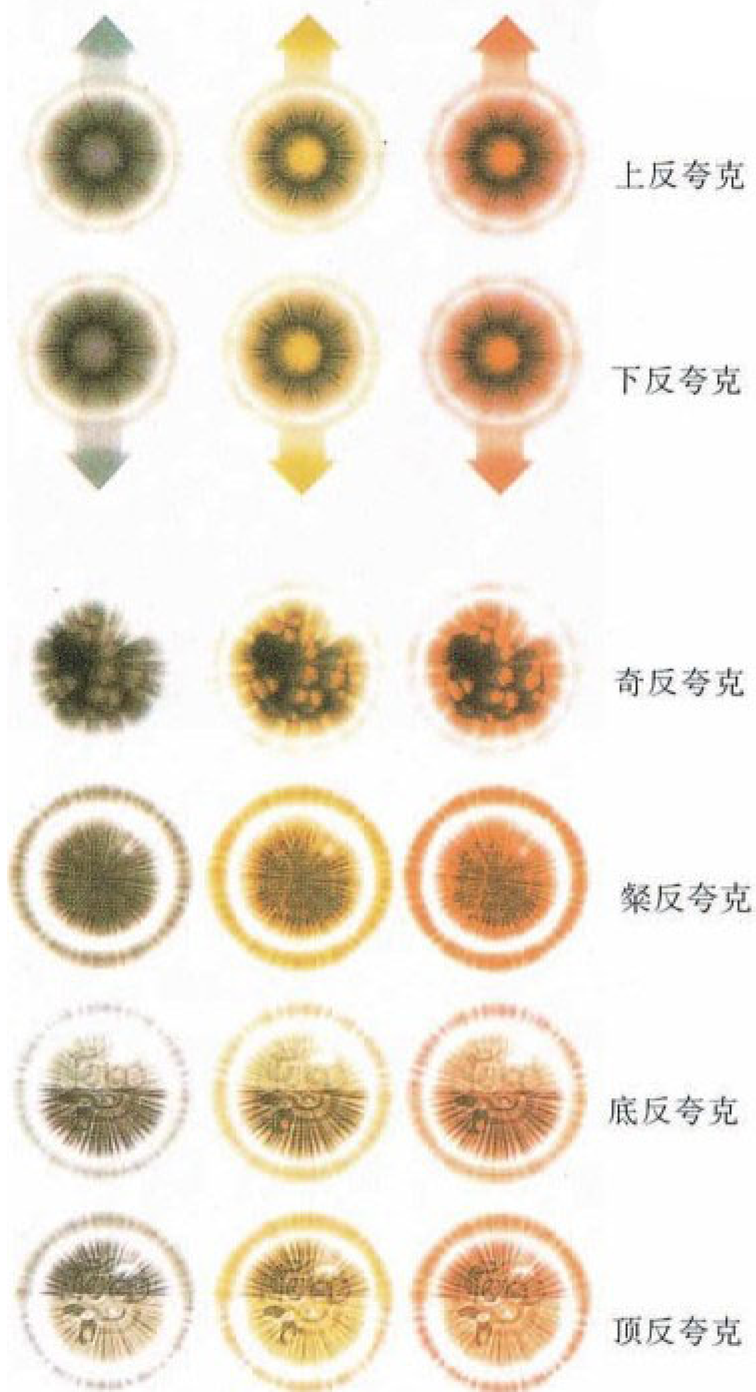


图5.4和图5.5　夸克存在6种味，每一种又有3种颜色。和夸克一样，反夸克也存在6种味，每一种又有3种反颜色（见96页）。

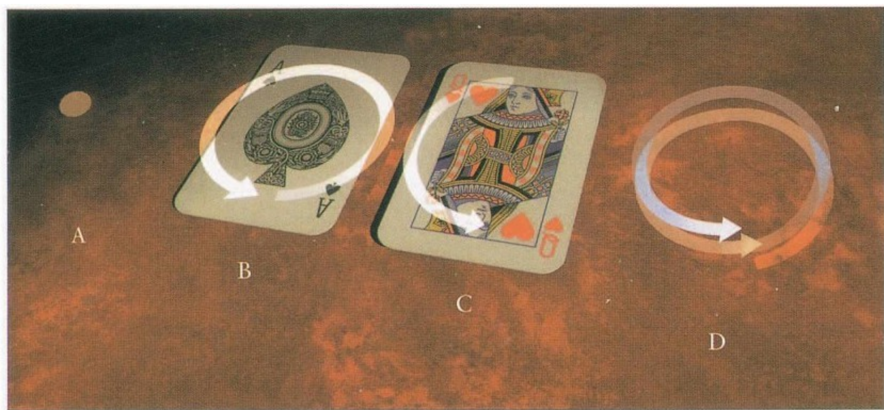


图5.6　基本粒子具有称为自旋的性质。自旋0的粒子从所有方面看都一样（A）。自旋1的粒子当它被转动整整360°后显得一样（B），而自旋2的粒子则只需要旋转180°（C）。然而，自旋1/2的粒子必须旋转两整圈才会显得一样（D）。

用上一章讨论的波粒二象性，包括光和引力的宇宙中的一切都能以粒子来描述。这些粒子有一种称为自旋的性质。考虑自旋的一个方法是将粒子想象成围绕着一个轴自转的小陀螺。然而，这可能会引起误会，因为量子力学告诉我们，粒子并没有任何轮廓分明的轴。粒子的自旋真正告诉我们的是，从不同的方向看粒子是什么样子的。一个自旋为0的粒子像一个点：从任何方向看都一样（图5.6-A）。另一方面，自旋为1的粒子像一个箭头：从不同方向看是不同的（图5.6-B）。只有把它转过一整圈（360°）时，这粒子才显得一样。自旋为2的粒子像个双头的箭头（图5.6-C）：只要把它转过半圈（180°），它看起来便一样。类似地，把更高自旋的粒子转了整圈的更小的部分后，它看起来便一样。所有这一切都是这样的直截了当，但惊人的事实是，把有些粒子转过一圈后，它仍然显得不同：你必须使其转两整圈！这样的粒子就说具有二分之一的自旋（图5.6-D）。



保罗·狄拉克（1902～1984），英国物理学家，他提出了反物质的存在。



沃尔夫冈·泡利（1900～1958），他发现了不相容原理。

宇宙间所有已知的粒子可以分成两组：自旋为二分之一的粒子，它们组成宇宙中的物质；自旋为0、1和2的粒子，正如我们将要看到的，它们在物质粒子之间产生力。物质粒子服从所谓的泡利不相容原理。这是奥地利物理学家沃尔夫冈·泡利在1925年发现的，他因此而获得1945

年的诺贝尔奖。他是个原型的理论物理学家，有人这样说，他的存在甚至会使同一城市里的实验出毛病！泡利不相容原理是说，两个类似的粒子不能存在于相同的态中，也就是说，在不确定性原理给出的限制下，它们不能同时具有相同的位置和速度。不相容原理是非常关键的，因为它解释了为何物质粒子，在自旋为0、1和2的粒子产生的力的影响下，不会坍缩成密度非常高的状态的原因：如果物质粒子几乎处在相同的位置，则它们必须有不同的速度，这意味着它们不会长时间存在于相同的位置。如果世界在没有不相容原理的情形下创生，夸克将不会形成分离的轮廓分明的质子和中子，进而这些也不可能和电子形成分离的轮廓分明的原子。它们全部都会坍缩形成大致均匀的稠密的“汤”。

直到保罗·狄拉克在1928年提出一个理论，人们才对电子和其他自旋二分之一的粒子有了正确的理解。狄拉克后来被选为剑桥的卢卡斯数学教授（牛顿曾经担任这一教席，目前我担任这一职务）。狄拉克理论是第一种既和量子力学又和狭义相对论相一致的理论。它在数学上解释了为何电子具有二分之一的自旋，也即为什么将其转一整圈不能、而转两整圈才能使它显得一样。它还预言了电子必须有它的配偶——反电子或正电子。1932年正电子的发现证实了狄拉克的理论，他因此获得了1933年的诺贝尔奖。现在我们知道，任何粒子都有会和它相湮灭的反粒子。（对于携带力的粒子，反粒子即为其自身）。也可能存在由反粒子构成的整个反世界和反人。然而，如果你遇到了反自身（图5.7），注意不要握手！否则，你们两人都会在一个巨大的闪光中消失殆尽。为何我们周围的粒子比反粒子多得多是一个极端重要的问题，我将会在本章的后部分回到这问题上来。



图5.8　物质粒子之间的相互作用可以被描述成交换携带力的粒子。



图5.7　如果你遇到反你，小心，不要握手！

在量子力学中，所有物质粒子之间的力或相互作用都认为是由自旋为整数0、1或2的粒子携带。所发生的是，物质粒子——譬如电子或夸克——发出携带力的粒子。这个发射引起的反弹，改变了物质粒子的速度。携带力的粒子然后和另一个物质粒子碰撞并且被吸收。这碰撞改变了第二个粒子的速度，正如同这两个物质粒子之间存在过一个力（图5.8）。携带力的粒子不服从泡利不相容原理，这是它们的一个重要的性质。这表明它们能被交换的数目不受限制，这样它们就可以引起很强的力。然而，如果携带力的粒子具有很大的质量，则在大距离上产生和交换它们就会很困难。这样，它们所携带的力只能是短程的。另一方面，如果携带力的粒子本身质量为零，力就是长程的了。因为在物质粒子之间交换的携带力的粒子，不像"实"粒子那样可以用粒子探测器检测到，所以称为虚粒子。然而，因为它们具有可测量的效应，即它们引起了物质粒子之间的力，所以我们知道它们存在。自旋为0、1或2的粒子在某些情况下也作为实粒子存在，这时它们可以被直接探测到。对我们而言，此刻它们就呈现出经典物理学家称为波动形式，例如光波和引力波的东西。当物质粒子以交换携带力的虚粒子的形式而相互作用时，它们有时就可以被发射出来。（例如，两个电子之间的电排斥力是由于交换

虚光子所致，这些虚光子永远不可能被检测出来；但是如果一个电子从另一个电子边穿过，则可以放出实光子，它作为光波而被我们探测到。）

携带力的粒子按照其强度以及与其相互作用的粒子可以分成四个种类。必须强调指出，这种将力划分成四种是人为的；它仅仅是为了便于建立部分理论，而并不别具深意。大部分物理学家希望最终找到一个统一理论，该理论将四种力解释为一个单独的力的不同方面。确实，许多人认为这是当代物理学的首要目标。最近，将四种力中的三种统一起来已经有了成功的端倪——我将在这一章描述这些内容。而关于统一余下的另一种力即引力的问题将留到以后。

第一种力是引力，这种力是万有的，也就是说，每一个粒子都因它的质量或能量而感受到引力。引力比其他三种力都弱得多。它是如此之弱，它若不具有两个特别的性质，我们根本就不可能注意到：它能作用到大距离去，以及它总是吸引的。这意味着，在像地球和太阳这样两个巨大的物体中，单独粒子之间的非常弱的引力能都叠加起来而产生相当大的力量。其他三种力要么是短程的，要么时而吸引时而排斥，所以它们倾向于相互抵消。以量子力学的方法来看待引力场，人们把两个物质粒子之间的力描述成由称作引力子的自旋为2的粒子携带的。它自身没有质量，所以携带的力是长程的。太阳和地球之间的引力可以归结为构成这两个物体的粒子之间的引力子交换。虽然所交换的粒子是虚的，它们确实产生了可测量的效应——它们使地球围绕着太阳公转！实引力子构成了经典物理学家称之为引力波的东西，它是如此之弱——并且要探测到它是如此之困难，以至于还从来未被观测到过。

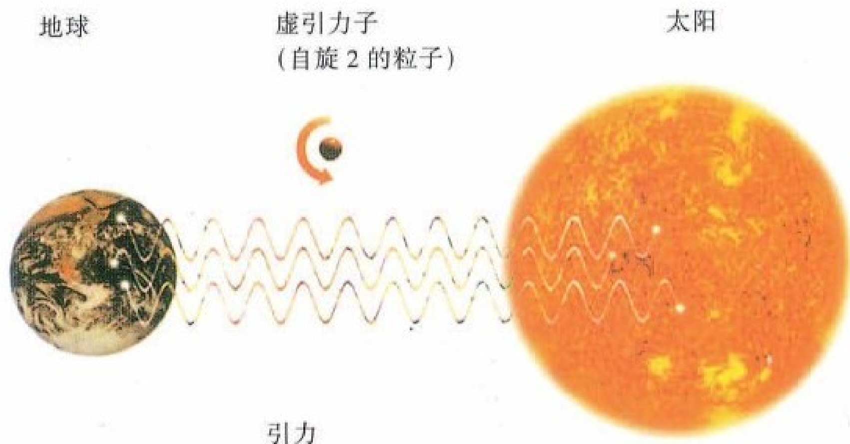


图5.9　在地球和太阳之间的引力是由交换虚引力子引起的：因为引力总是吸引的，因此在地球和太阳中的单独粒子之间的微弱的力叠加成一个巨大的力。

另一种力是电磁力。它作用于带电荷的粒子（例如电子和夸克）之间，但不和不带电荷的粒子（例如引力子）相互作用。它比引力强得多：两个电子之间的电磁力比引力大约大100亿亿亿亿亿（在1后面有42个0）倍。然而，存在两种电荷——正电荷和负电荷。同种电荷之间的力是相互排斥的，而异种电荷之间的力则是相互吸引的。一个大的物体，譬如地球或太阳，包含了几乎等量的正电荷和负电荷。这样，由于单独粒子之间的吸引力和排斥力几乎全被抵消了，因此两个物体之间净的电磁力非常小。然而，电磁力在原子和分子的小尺度下起主要作用。在带负电的电子和带正电的核中的质子之间的电磁力使得电子围绕着原子的核公转，正如同引力使得地球围绕着太阳公转一样。人们将电磁吸引力描绘成是由于交换大量称作光子的无质量的自旋为1的虚粒子引起的。重复一下，这里交换的光子是虚粒子。但是，电子从一个允许轨道转变到另一个离核更近的允许轨道时，释放能量并且发射出实光子——如果其波长适当，则作为可见光可被肉眼观察到，或可用诸如照相底版的光子探测器观察到。同样，如果一个光子和原子相碰撞，可将电子从离核较近的允许轨道移动到较远的轨道。这样光子的能量被消耗掉，它也就被吸收了。

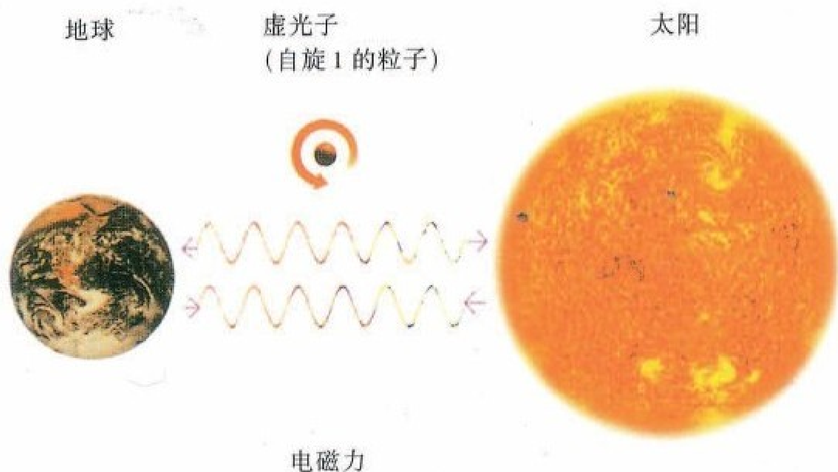


图5.10　在由虚光子携带的电磁力的情形，力可以是吸引的，也可以是排斥的，这样在地球和太阳中的粒子之间的力大部分都被抵消了。

第三种力称为弱核力。它负责放射性现象，并只作用于自旋为二分之一的所有物质粒子，而对诸如光子、引力子等自旋为0、1或2的粒子不起作用。直到1967年伦敦帝国学院的阿伯达斯·萨拉姆和哈佛的史蒂芬·温伯格提出了弱作用和电磁作用的统一理论后，弱作用才被很好地理解。此举在物理学界所引起的震动，可与大约100年前麦克斯韦统一电学和磁学相提并论。他们提出，除了光子，还存在其他3个自旋为1的被统称作重矢量玻色子的粒子，它们携带弱力。它们称作W^+（W正），W^-（W负）和Z^0（Z零），每一个都具有大约100吉电子伏的质量（1吉电子伏为10亿电子伏）。温伯格-萨拉姆理论展现了称作对称自发破缺的性质。这意味着，在低能量下一些看起来完全不同的粒子，事实上发现都只是同一种粒子处于不同的状态，所有这些粒子在高能量下都有相似的行为。这个效应和轮赌盘上的轮赌球的行为相类似。在高能量下（当这轮子转得很快时），这球的行为基本上只有一个方式——即不断地滚动着。但是随着轮子变慢下来，球的能量减小，最终球就陷到轮子上的37个槽中的一个里去。换言之，在低能下球可以存在于37种不同的状态。如果由于某种原因，我们只能在低能下观察球，我们就会以为存在37种不同类型的球！

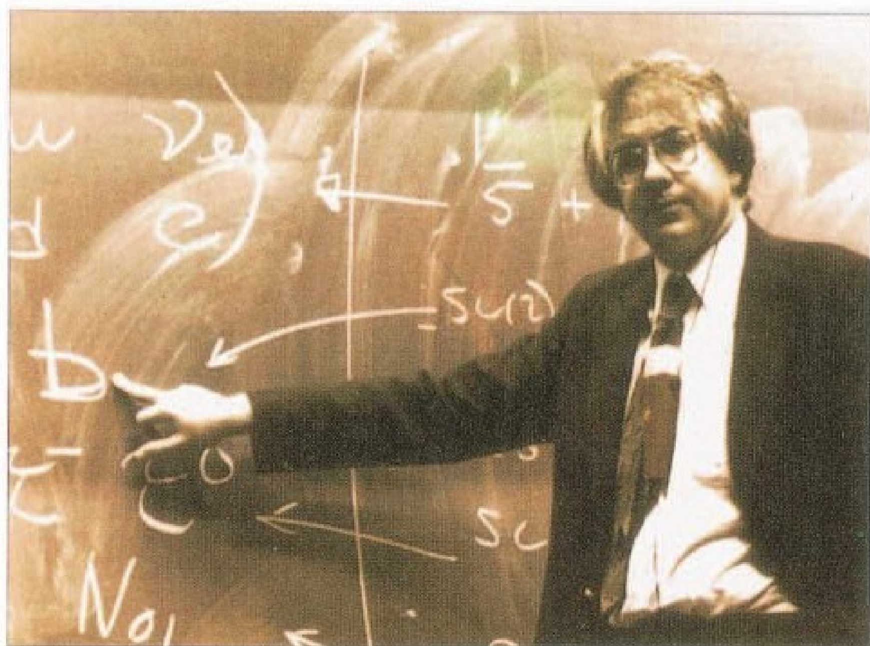


当轮赌盘快速旋转时，轮赌球可以在所有可能的位_置之间自由运动。然而，当轮赌盘缓慢下来，球就会停到37个不同位置中的一个。

在温伯格-萨拉姆理论中，当能量远远超过100吉电子伏时，这3种新粒子和光子都以相似的方式行为。但是，大部分正常情况下粒子能量要比这低，粒子之间的对称被破坏了。W^+，W^-和Z^0得到了大的质量，使之携带的力变成非常短程。萨拉姆和温伯格提出此理论时，很少人相信他们，因为加速器还未强大到将粒子加速到产生实的W^+，W^-和Z^0粒子所需的100吉电子伏的能量。但在此后的十几年里，在较低能量下这个理论的其他预言和实验符合得这样好，使他们和也在哈佛的谢尔登·格拉肖一起获得1979年的诺贝尔物理学奖。格拉肖提出过一个类似的统一电磁和弱作用的理论。由于1983年在CERN（欧洲核子研究中心）发现了具有被正确预言的质量和其他性质的光子的3个有质量的伴侣，使得诺贝尔委员会避免了犯错误的难堪。领导几百名物理学家作出此发现的卡罗·鲁比亚和开发了被使用的反物质储藏系统的CERN工程师西蒙·范德·米尔分享了1984年的诺贝尔奖。（除非你已经是巅峰人物，当今要在实验物理学上留下痕迹极其困难！）



史蒂芬·温伯格（1933～）。温伯格最重要的工作是电磁力和弱核力的统一。



谢尔登·格拉肖（1932～）格拉肖最早提出了将电磁力和弱核力联结在一起的一个模型。

第四种力是强核力。它将质子和中子中的夸克束缚在一起，并将原子核中的质子和中子束缚在一起。人们相信，称为胶子的另一种自旋为1的粒子携带强作用力，它只能与自身以及与夸克相互作用。强核力具有一种称为禁闭的古怪性质：它总是把粒子束缚成不带颜色的结合体。由于夸克有颜色（红、绿或蓝），人们不能得到单独的夸克自身。相反，一个红夸克必须用一串胶子和一个绿夸克以及一个蓝夸克联结在一起（红＋绿＋蓝＝白）。这样的三胞胎构成了一个质子或中子（图5.11）。其他的可能性是由一个夸克和一个反夸克组成的对（红＋反红，或绿＋反绿，或蓝＋反蓝＝白）（图5.12）。这样的结合体构成了称为介子的粒子。介子是不稳定的，因为夸克和反夸克会相互湮灭，而产生电子和其他粒子。类似地，由于胶子也有颜色，色禁闭使得人们不可能得到单独的胶子自身。相反，人们所能得到的胶子的团，其叠加起来的颜色必须是白的。这样的团形成了称为胶球的不稳定粒子。

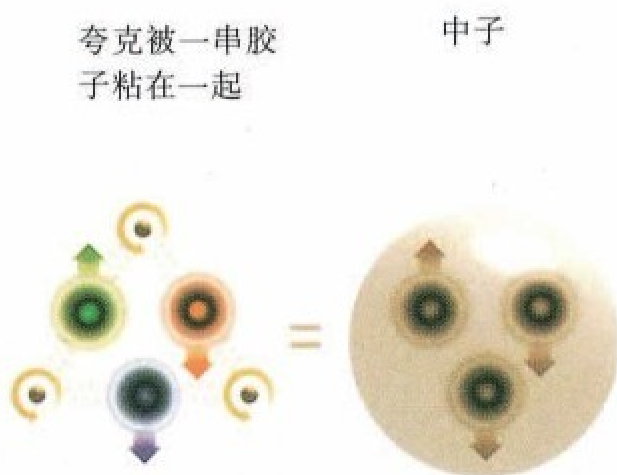


图5.11　夸克只能存在于无色的组合之中。红、绿和蓝夸克被胶子束缚形成一个“白”中子。

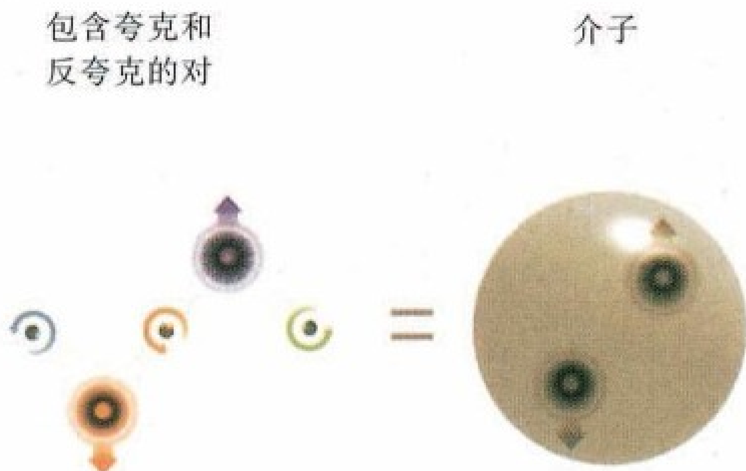
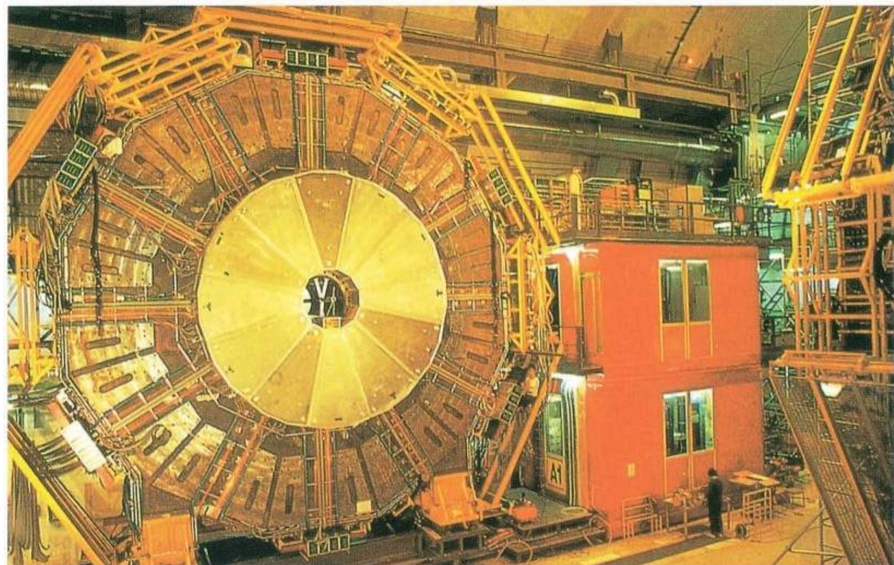


图5.12　由夸克和反夸克还可以组成无色的组合，其颜色被对消了（如红＋反红）。

色禁闭使得人们观察不到一个孤立的夸克或胶子，这事实使得将夸克和胶子当做粒子的整个见解看起来有点玄学的味道。然而，强核力还有一种叫做渐近自由的性质，它使得夸克和胶子成为意义明确的概念。在正常能量下，强核力确实很强，它将夸克紧紧地捆在一起。但是，大型粒子加速器的实验指出，强作用力在高能量下变得弱得多，夸克和胶子的行为就几乎像自由粒子那样。98页的图5.13是一张显示一个高能质子和一个高能反质子碰撞的照片。

统一电磁力和弱核力的成功，使人们多次试图将这两种力和强核力合并在所谓的大统一理论（或GUT）之中。这名字相当夸张：得到的理论并不那么辉煌，也没能将全部力都统一进去，因为它并不包含引力。它们也不是真正完整的理论，因为它们包含了许多不能从这理论中预言而必须人为选择去适合实验的参数。尽管如此，它们可能是朝着完备的统一理论推进的一步。GUT的基本思想是这样：正如前面提到的，在高能量下强核力变弱了；另一方面，不是渐近自由的电磁力和弱力在高能量下变强了。在某个非常高的叫做大统一能量的能量下，这3种力都具有同样的强度，并因此可看成一个单独的力的不同方面。在这能量下，GUT还预言了自旋为二分之一的不同物质粒子（如夸克和电子）也会根本上都变成一样，这样导致了另一种统一。



在瑞士日内瓦附近的CERN的ALEPH检测器的一个终端盖子。在这种加速器中进行高能粒子碰撞，研究者可以创造类似于大爆炸之后存在的状态。

大统一能量的数值还知道得不太清楚，可能至少有1000万亿吉电子伏特。而目前粒子加速器只能使大致能量为100吉电子伏的粒子相碰撞，而计划建造的机器的能量可升到几千吉电子伏。要建造足以将粒子加速到大统一能量的机器，其体积必须和太阳系一样大——这在现代经济环境下不太可能做到。因此，不可能在实验室里直接检验大统一理论。然而，如同在弱电统一理论中那样，我们可以检验它在低能量下的推论。

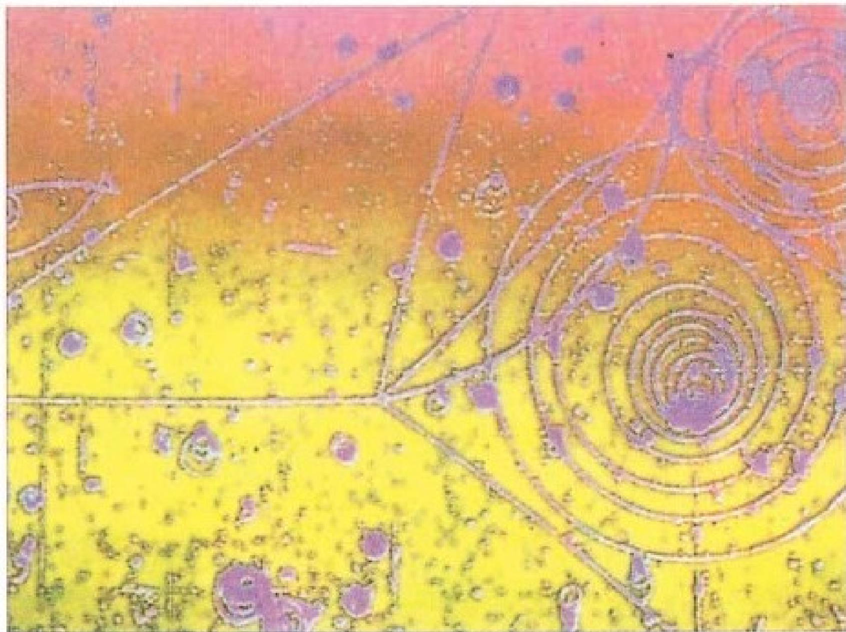
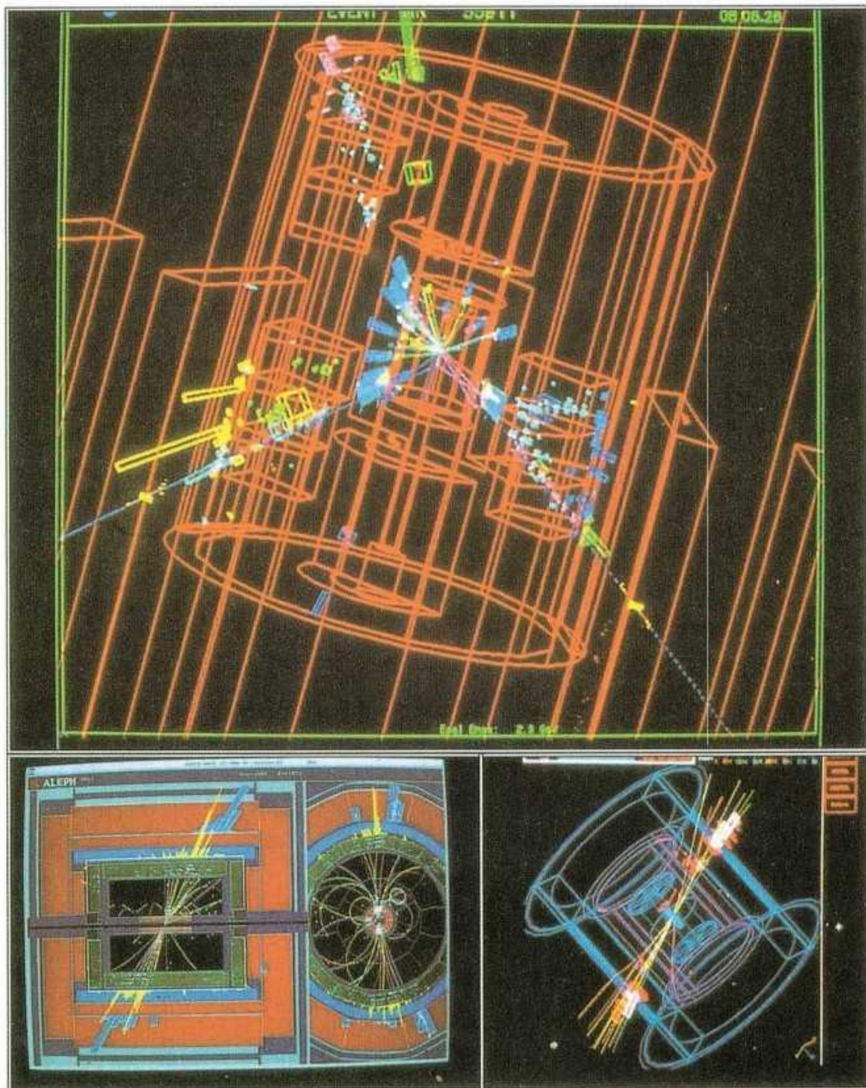


图5.13　在一个云雾室中加速粒子轨迹的彩色反转片。在中央交点发生反质子和质子的湮灭。

其中最有趣的预言是，构成通常物质的大部分质量的质子能够自发衰变成诸如反电子之类更轻的粒子。之所以可能，其原因在于，在大统一能量下，夸克和反电子之间没有本质的不同在正常情况下一个质子中的三个夸克没有足够能量转变成反电子，由于不确定性原理意味着质子中夸克的能量不可能严格不变，其中一个夸克会非常偶然地获得足够能量进行这种转变。这样质子就要衰变。夸克要得到足够能量的概率是如此之低，至少要等待100万亿亿亿（1后面跟30个0）年才能有1次。这比宇宙从大爆炸以来的年龄（大约100亿-1后面跟10个0年）要长得多了。因此，人们会认为不可能在实验上检测到质子自发衰变的可能性。然而，人们可以观察包含极大数量质子的大量物质，以增加检测衰变的机会。（譬如，如果观察的对象含有1后面跟31个0个质子，按照最简单的GUT，可以预料在1年内应能看到多于一次的质子衰变）。



使用CERN的ALEPH检测器的最新研究制作计算机生成的图象，该图象表明一个粒子通过夸克-反夸克对衰变成许多粒子。

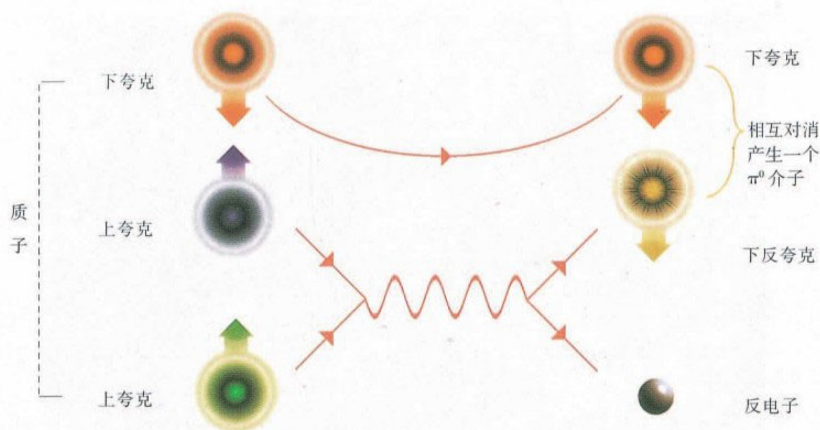


图5.14　在大统一理论中一个质子中的两个上夸克和一个下夸克会变成一个下/下反π0介子和一个反电子。

人们进行了一系列实验，可惜没有得到任何质子或中子衰变的确实证据。有一个实验是在俄亥俄的莫尔顿盐矿里进行的（为了避免其他因宇宙射线引起的会和质子衰变相混淆的事件发生），用了8000吨水。由于在实验中没有观测到自发的质子衰变，因此可以估算出，可能的质子寿命至少应为1000万亿亿亿（1后面跟31个0）年。这比简单的大统一理论所预言的寿命更长。然而，一些更精致的大统一理论预言的寿命比这更长，因此需要用更灵敏的手段对甚至更大量的物质进行检验。

尽管观测质子的自发衰变非常困难，但很可能正由于这相反的过程，即质子，或更简单地说，夸克的产生导致了我们的存在。它们是从宇宙开初的可以想象的最自然的方式——夸克并不比反夸克更多的状态下产生的。地球上的物质主要是由质子和中子，进而由夸克构成。除了少数由物理学家在大型粒子加速器中产生的以外，不存在由反夸克构成的反质子和反中子。我们从宇宙线中得到的证据表明，我们星系中的所有物质也是这样：除了少数当粒子和反粒子对进行高能碰撞时产生的以外，没有发现反质子和反中子如果在我们星系中有很大区域的反物质，则可以预料，在正反物质的边界会观测到大量的辐射。许多粒子在那里和它们的反粒子相碰撞、相互湮灭并释放出高能辐射。

我们没有直接的证据，表明其他星系中的物质是由质子、中子还是由反质子、反中子构成，但两者必居其一，在单一的宇宙中不能有混合，否则我们又会观察到大量由湮灭产生的辐射。因此，我们相信，所

有的星系是由夸克而不是反夸克构成；看来，一些星系为物质，而另一些星系为反物质也是难以置信的。

为什么夸克比反夸克多这么多？为何它们的数目不相等？这数目有所不同肯定使我们交了好运，否则，早期宇宙中它们势必已经相互湮灭了，只余下一个充满辐射而几乎没有物质的宇宙。因此，后来也就不会有人类生命赖以发展的星系、恒星和行星。庆幸的是，大统一理论可以解释，尽管甚至刚开始时两者数量相等，为何现在宇宙中夸克比反夸克多。正如我们已经看到的，大统一理论允许夸克变成高能下的反电子。它们也允许相反的过程，反夸克变成电子，电子和反电子变成反夸克和夸克。在极早期宇宙有一时期是如此之热，粒子能量高到足以发生这些转变。但是，它为何使夸克比反夸克多呢？原因在于，物理定律对于粒子和反粒子不是完全相同的。

直到1956年人们都相信，物理定律分别服从三个叫做C、P和T的对称。C（电荷）对称的意义是，定律对于粒子和反粒子是相同的；P（宇称）对称的意义是，定律对于任何情景和它的镜像（右手方向自旋的粒子的镜像变成了左手方向自旋的粒子）是相同的；T（时间）对称的意义是，如果你颠倒所有粒子和反粒子的运动方向，系统应回到早先的那样；换言之，定律对于前进或后退的时间方向是一样的。1956年，两位美国物理学家李政道和杨振宁提出弱作用实际上不服从P对称。换言之，弱力使得宇宙和宇宙的镜像以不同的方式发展。同一年，他们的一位同事吴健雄证明了他们的预言是正确的。她把放射性原子的核排列在磁场中，使它们的自旋方向一致。实验表明，在一个方向比另一方向发射出更多的电子。次年，李和杨为此获得诺贝尔奖。人们还发现弱作用不服从C对称，即是说，它使得由反粒子构成的宇宙以和我们的宇宙不同的方式行为。尽管如此，弱力似乎确实服从CP联合对称。也就是说，如果每个粒子都用其反粒子来取代，则由此构成的宇宙的镜像和原来的宇宙以同样的方式发展！然而，1964年，还是两个美国人——J·W·克罗宁和瓦尔·费兹——发现，在某种称为K介子的衰变中，甚至连CP对称也不服从。1980年，克罗宁和费兹最终由于他们的研究而获得诺贝尔奖。（很多奖是因为显示宇宙不像我们曾经想象的那么简单而授予的！）

有一个数学定理说，任何服从量子力学和相对论的理论必须服从CPT联合对称。换言之，如果同时用反粒子来置换粒子，取镜像还有时间反演，则宇宙的行为必须是一样的。但是，克罗宁和费兹指出，如果

仅仅用反粒子来取代粒子，并且采用镜像，但不反演时间方向，则宇宙的行为不相同。所以，如果人们反演时间方向，物理学定律必须改变——它们不服从T对称。

早期宇宙肯定是不服从T对称的：随着时间前进，宇宙膨胀——如果它往后倒退，则宇宙收缩。而且，由于存在着不服从T对称的力，因此当宇宙膨胀时，相对于将电子变成反夸克，这些力将更多的反电子变成夸克。然后，随着宇宙膨胀并冷却下来，反夸克就和夸克湮灭，但由于已有的夸克比反夸克多，少量过剩的夸克就留了下来。正是它们构成我们今天看到的物质，由这些物质构成了我们自身。这样，我们自身之存在可认为是大统一理论的证实，哪怕仅仅是定性的而已；但此预言的不确定性到了这种程度，以至于我们不能知道在湮灭之后余下的夸克数目，甚至不知是夸克还是反夸克余下。（然而，如果是反夸克多余留下，我们可以简单地把反夸克称为夸克，夸克称为反夸克。）

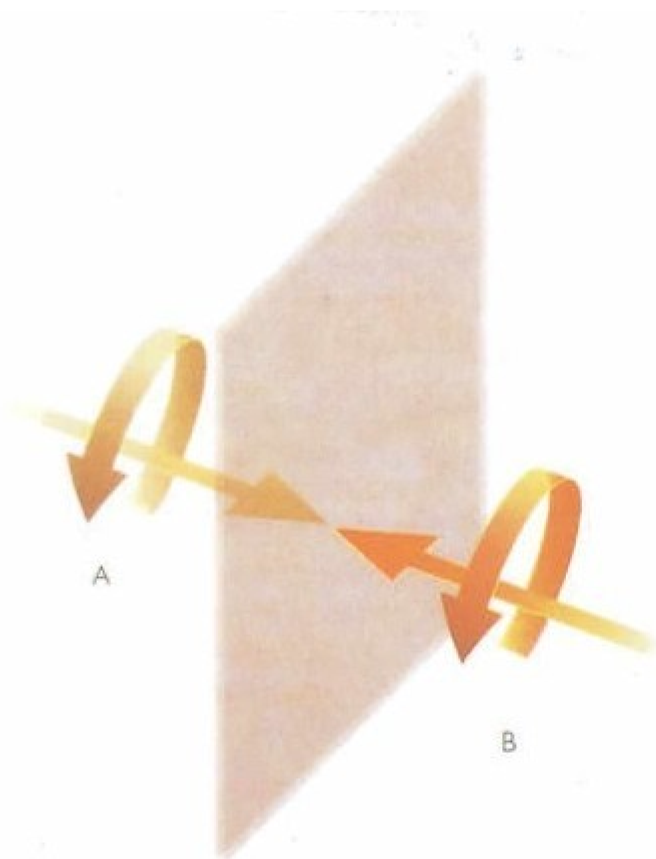


图5.15　具有右手自旋的一个粒子的镜像是一个具有左手自旋的粒子。如果P对称成立，则物理定律对于两者是相同的。

大统一理论不包括引力。在我们处理基本粒子或原子问题时这关系不大，因为引力是如此之弱，通常可以忽略它的效应。然而，它的作用既是长程的，又总是吸引的事实，表明它的所有效应是叠加的。所以，对于足够大量的物质粒子，引力会比其他所有的力都更重要。这就是为什么正是引力决定了宇宙的演化的缘故。甚至对于恒星大小的物体，引力的吸引会超过所有其他的力，并使恒星坍缩。我在70年代的工作集中于研究黑洞。黑洞就是由这种恒星的坍缩和围绕它们的强大的引力场产生的。正是黑洞研究给出了量子力学和广义相对论如何相互影响的第一个暗示——亦即尚未成功的量子引力论形态的一瞥。

第六章　黑洞

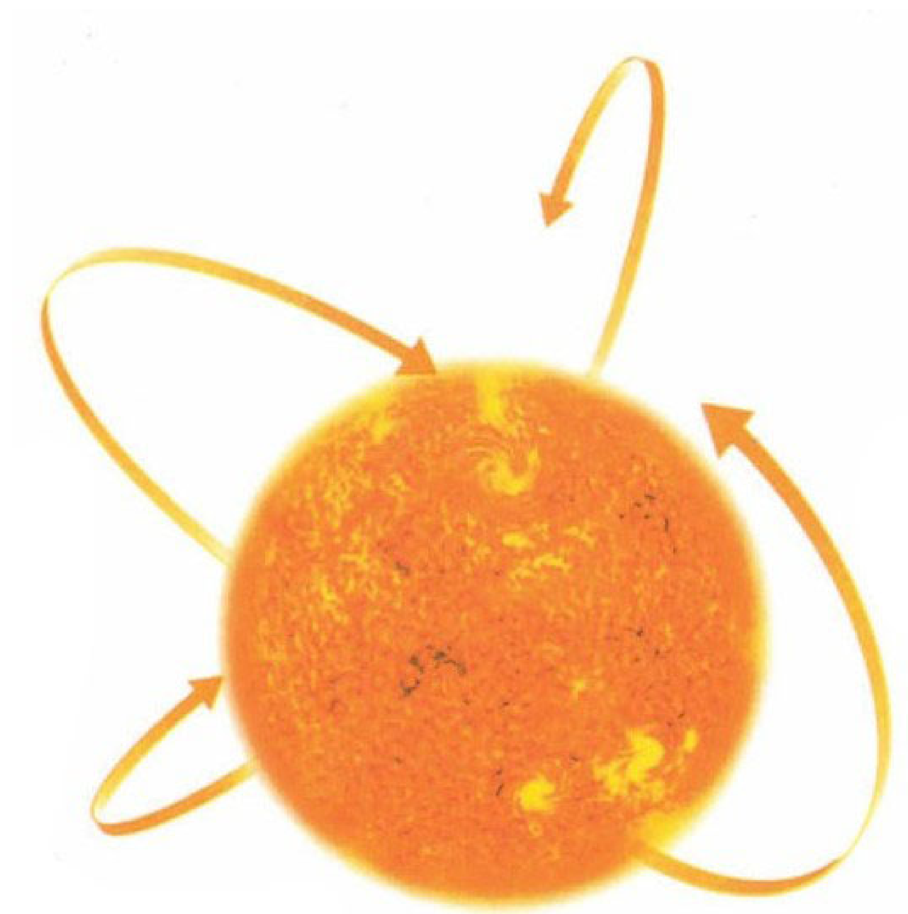


图6.1　约翰·米歇尔的思想是一个恒星的质量如此之大，以至于从它表面发射的光被它强大的引力场拉回去，使它不被看见。这些“暗恒星”是现代黑洞的18世纪的前身。

黑洞这一术语是不久以前才出现的。1969年美国科学家约翰·惠勒，为了形象地描述至少可回溯到200年前的一个观念时，杜撰了这个名词。那时候，共有两种光理论：一种是牛顿赞成的光的微粒说；另一种是光由波构成的波动说。我们现在知道，这两者在实际上都是正确的由于量子力学的波粒二象性，光既可认为是波，也可认为是粒子。在光的波动说中，不清楚光对引力如何响应。但是如果光是由粒子组成的，人们可以预料，它们正如同炮弹、火箭和行星一样受引力的影响。人们起先以

为，光粒子无限快地运动，所以引力不可能使之缓慢下来，但是罗默关于光以有限速度行进的发现意味着，引力对之可有重要效应。

1783年，剑桥的学监约翰·米歇尔在这个假定的基础上，于《伦敦皇家学会哲学学报》上发表了一篇文章。他指出，一个质量足够大并足够致密的恒星会有如此强大的引力场，甚至连光线都不能逃逸：任何从恒星表面发出的光，在还没到达远处前就会被恒星的引力吸引回来。米歇尔暗示，可能存在大量这样的恒星，虽然由于从它们那里发出的光不会到达我们这里，我们不能看到它们；但是我们仍然可以感到它们引力的吸引。这正是我们现在称为黑洞的物体。它是名副其实的——在空间中的黑的空洞。几年之后，法国科学家拉普拉斯侯爵显然独自地提出了和米歇尔类似的观念。非常有趣的是，拉普拉斯只将此观点纳入他的《世界系统》一书的第一版和第二版中，而在以后的版本中将其删去；也许他认为这是一个愚蠢的观念。（还有，光的微粒说在19世纪变得不时髦了；似乎一切都可以以波动理论来解释，而按照波动理论，不清楚光究竟是否受到引力的影响。）

事实上，因为光速是固定的，所以在牛顿引力论中将光类似炮弹那样处理不很协调（从地面发射上天的炮弹被引力减速，最后停止上升并折回地面；然而，一个光子必须以不变的速度继续向上，那么，牛顿引力如何影响光呢？）直到1915年爱因斯坦提出广义相对论，才得到引力如何影响光的协调理论。甚至又过了很长时间，人们才理解这个理论对大质量恒星的含意。

为了理解黑洞是如何形成的，我们首先需要理解恒星的生命周期起初，大量的气体（绝大部分为氢）受自身的引力吸引，而开始向自身坍缩而形成恒星、当它收缩时，气体原子越来越频繁地以越来越大的速度相互碰撞——气体的温度上升。最后，气体变得如此之热，以至于当氢原子碰撞时，它们不再弹开而是聚合形成氦。如同一个受控氢弹爆炸，反应中释放出来的热使得恒星发光。这附加的热又使气体的压力升高，直到它足以平衡引力的吸引，这时气体停止收缩。这有一点像气球——内部气压试图使气球膨胀，橡皮的张力试图使气球收缩，它们之间存在一个平衡。从核反应发出的热和引力吸引的平衡，使恒星在很长时间内维持这种平衡（见图6.2中的“主序星”）。然而，恒星最终会耗尽它的氢和其他核燃料。貌似大谬，其实不然的是，恒星初始的燃料越多，它则被越快燃尽。这是因为恒星的质量越大，它就必须越热才足以抵抗引

力。而它越热，它的燃料就被耗得越快。我们的太阳大概足够再燃烧50多亿年，但是质量更大的恒星可以在1亿年这么短的时间内耗尽其燃料，这个时间尺度比宇宙的年龄短得多了。当恒星耗尽了燃料，它开始变冷并收缩。随后发生的情况只有等到20世纪20年代末才首次被人们理解。

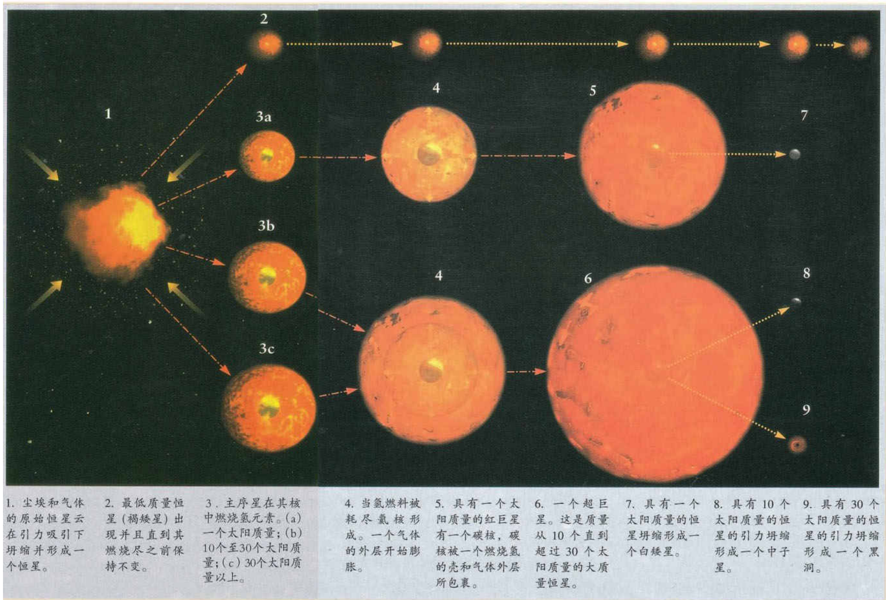
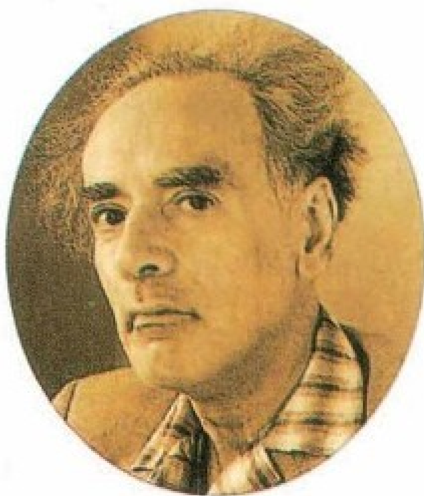


图6.2　曲型恒星的诞生、演化和死亡。如果一个恒星的质量比昌德拉塞卡极限还小，它最终会成为褐矮星或白矮星，如果它超过这个极限，该超巨星的最后引力坍缩会产生一个中子星或一个黑洞。



阿瑟·斯坦利·爱丁顿（1882-1944）



列夫·达维多维奇·朗道（1908-1968）



萨拉玛尼安·昌德拉塞卡（1910-1995）

1928年，一位印度研究生——萨拉玛尼安·昌德拉塞卡——乘船来英国剑桥跟英国天文学家兼广义相对论家阿瑟·爱丁顿爵士学习。（据记载，在20世纪20年代初，有一位记者告诉爱丁顿，说他听说世界上只有三个人能理解广义相对论。爱丁顿停顿了一下，然后回答："我正在想这第三个人是谁？"）在从印度来英国的旅途中，昌德拉塞卡算出了在耗尽

所有燃料之后，多大的恒星仍然可以对抗自己的引力而维持本身。这个思想是说：当恒星变小时，物质粒子相互靠得非常近，而按照泡利不相容原理，它们必须有非常不同的速度。这使得它们相互散开并企图使恒星膨胀。因此，一颗恒星可因引力的吸引和不相容原理引起的排斥达到的平衡，而保持其半径不变，正如同在它的生命的早期引力被热平衡一样。

然而，昌德拉塞卡意识到，不相容原理所能提供的排斥力有一个极限。相对论把恒星中的粒子的最大速度差限制为光速。这意味着，当恒星变得足够密集之时，由不相容原理引起的排斥力就会比引力的作用小。昌德拉塞卡计算出，一个质量比大约太阳质量一倍半还大的冷的恒星不能维持本身以抵抗自己的引力。（这质量现在称为昌德拉塞卡极限。）苏联科学家列夫·达维多维奇·朗道差不多同时得到了类似的发现。

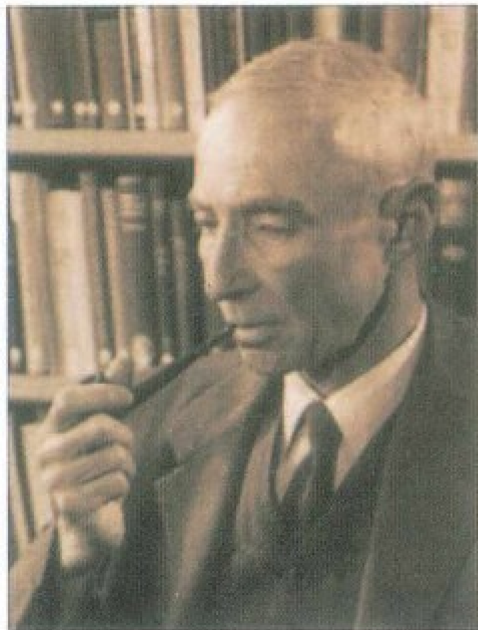
这对大质量恒星的最终归宿具有重大的意义。如果一颗恒星的质量比昌德拉塞卡极限小，它最后会停止收缩，并且变成一种可能的终态——“白矮星”。白矮星的半径为几千英里，密度为每立方英寸几百吨。白矮星是由它物质中电子之间的不相容原理排斥力支持的。我们观察到大量这样的白矮星。围绕着天狼星转动的那颗是最早被发现的白矮星中的一个，天狼星是夜空中最亮的恒星。

朗道指出，恒星还存在另一种可能的终态。其极限质量大约也为太阳质量的一倍或二倍，但是其体积甚至比白矮星还小得多。这些恒星是由中子和质子之间，而不是电子之间的不相容原理排斥力支持的，所以它们叫做中子星。它们的半径只有10英里左右，密度为每立方英寸几亿吨。在第一次预言中子星时，没有任何方法去观察它。实际上，它们很久以后才被探测到。另一方面，质量比昌德拉塞卡极限还大的恒星在耗尽其燃料时，会出现一个很大的问题。在某种情形下，它们会爆炸或设法抛出足够的物质，使它们的质量减小到极限之下，以避免灾难性的引力坍缩。但是很难令人相信，不管恒星有多大，这总会发生。怎么知道它一定损失重量呢？即使每个恒星都设法失去足够多的质量以避免坍缩，如果你把更多的质量加在白矮星或中子星上，以使之超过极限，将会发生什么？它会坍缩到无限密度吗？爱丁顿为此感到震惊，他拒绝相信昌德拉塞卡的结果。爱丁顿认为，一颗恒星是根本不可能坍缩成一点的。这是大多数科学家的观点：爱因斯坦自己写了一篇论文，宣布恒星的体积不会收缩为零。其他科学家，尤其是他以前的老师，恒星结构的

主要权威——爱丁顿的敌意使昌德拉塞卡放弃了这方面的工作，而转去研究诸如恒星团运动等其他天文学问题。然而，他之所以获得1983年诺贝尔奖，至少部分原因在于他早年所做的关于冷恒星的质量极限的工作。

昌德拉塞卡指出，不相容原理不能够阻止质量大于昌德拉塞卡极限的恒星发生坍缩。但是，根据广义相对论，这样的恒星会发生什么情况呢？1939年一位美国的年轻人罗伯特·奥本海默首次解决了这个问题。然而，他所获得的结果表明，用当时的望远镜去检测不会有任何观测结果。以后，第二次世界大战插入，奥本海默本人非常专心地从事原子弹研制。战后，由于大部分科学家被吸引到原子和原子核尺度的物理中去，因而大部分人忘记了引力坍缩的问题。但在20世纪60年代，现代技术的应用使得天文观测范围和数量大大增加，这重新激起人们对天文学和宇宙学的大尺度问题的兴趣。奥本海默的工作被一些人重新发现并推广。

现在，我们从奥本海默的工作中得到一幅这样的图象：恒星的引力场改变了光线在时空中的路径，使之和如果没有恒星情况下的路径不一样。光锥是表示闪光从其顶端发出后在时空中传播的路径。光锥在恒星表面附近稍微向内弯折。在日食时观察从遥远恒星发出的光线，可以看到这种偏折现象。随着恒星收缩，其表面的引力场变得更强大，而光锥向内偏折得更多。这使得光线从恒星逃逸变得更为困难，对于远处的观察者而言，光线变得更黯淡更红。最后，当恒星收缩到某一临界半径时，表面上的引力场变得如此之强，使得光锥向内偏折得这么厉害，以至于光线再也逃逸不出去（图63）。根据相对论，没有东西能行进得比光还快。这样，如果光都逃逸不出来，其他东西更不可能；所有东西都会被引力场拉回去。这样，存在一个事件的集合或时空区域，光或任何东西都不可能从该区域逃逸而到达远处的观察者现在我们将这区域称作黑洞，将其边界称作事件视界，而它和刚好不能从黑洞逃逸的光线的那些路径相重合。



罗伯特·奥本海默（1904-1967）。从1942年至1945年他任新墨西哥州的洛斯阿拉莫斯实验室主任，第一个原子弹便是在此处制造的。

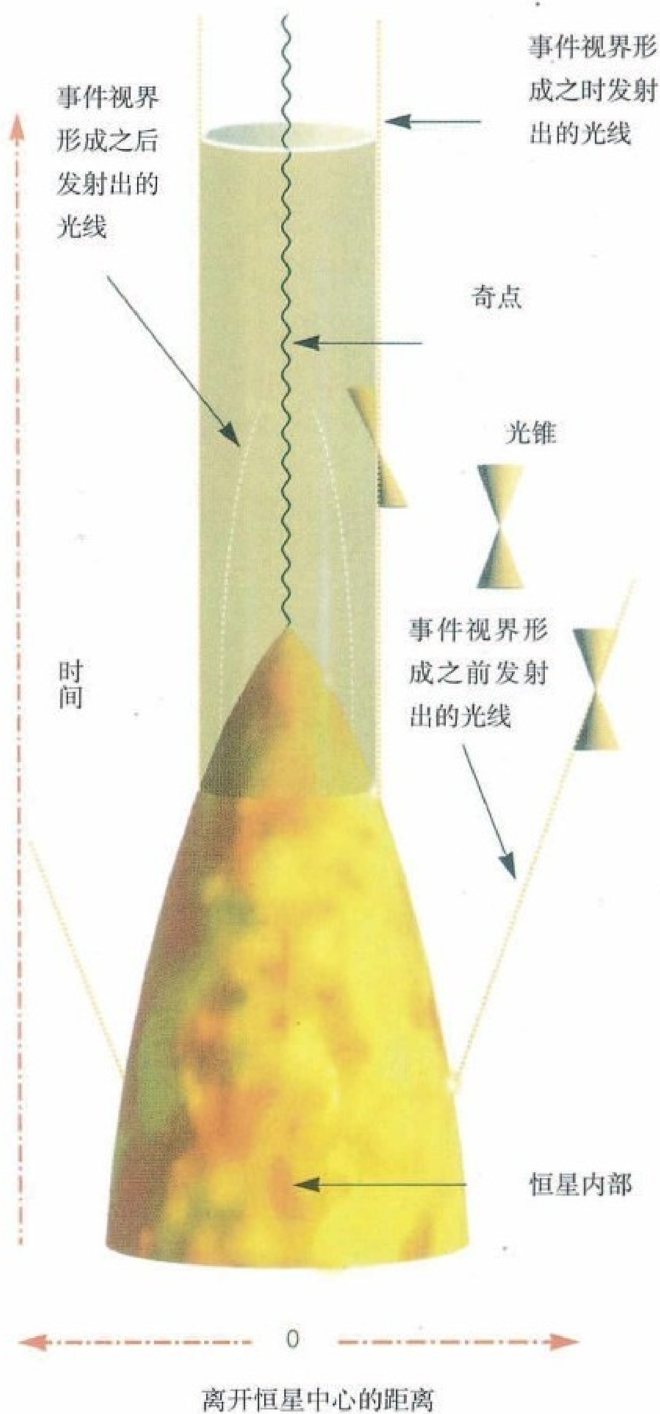
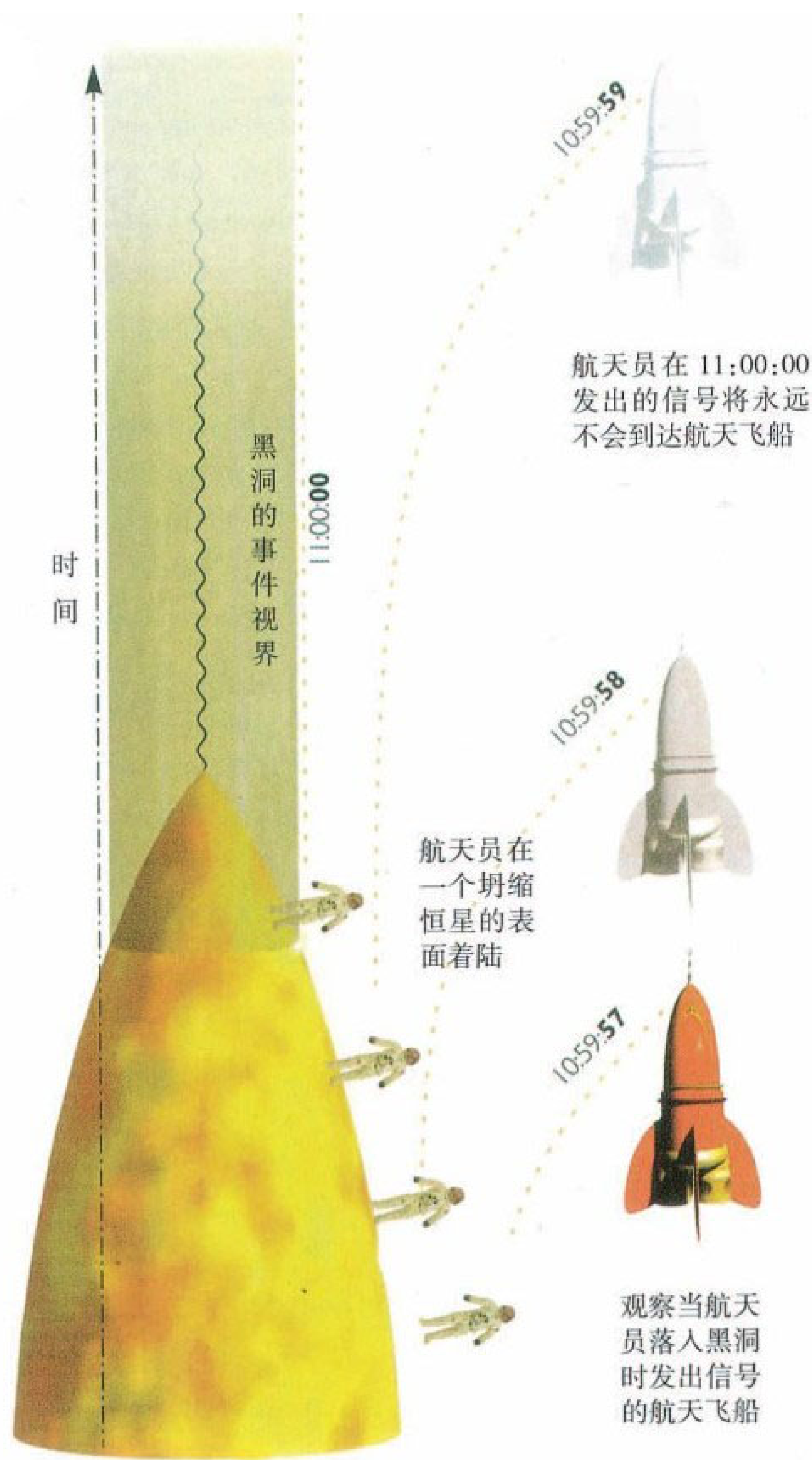


图6.3　大质量恒星坍缩形成一个黑洞的时空图。

如果你观察一个恒星坍缩并形成黑洞时，为了理解你所看到的情况，切记在相对论中没有绝对时间。每个观测者都有自己的时间测量。由于恒星的引力场，在恒星上某人的时间将和在远处某人的时间不同。假定在坍缩星表面有一无畏的航天员和恒星一起向内坍缩。他按照自己的表，每一秒钟发一信号到一个围绕着该恒星转动的航天飞船上去。在他的表的某一时刻，譬如11点钟，恒星刚好收缩到它的临界半径以下，此时引力场强大到没有任何东西可以逃逸出去，他的信号再也不能传到航天飞船了。随着11点趋近，他的伙伴从航天飞船上观看会发现，从该航天员发来的一串信号的时间间隔越变越长。但是这个效应在10点59分59秒之前是非常微小的。在收到10点59分58秒和10点59分59秒发出的两个信号之间，他们只需等待比1秒钟稍长一点的时间，然而他们必须为11点发出的信号等待无限长的时间。按照航天员的手表，光波是在10点59分59秒和11点之间由恒星表面发出；从航天飞船上看，那光波被散开到无限长的时间间隔里。在航天飞船上这一串光波来临的时间间隔变得越来越长，所以从恒星来的光显得越来越红、越来越淡，最后，该恒星变得如此之朦胧，以至于从航天飞船上再也看不见它：所余下的一切只是空间中的一个黑洞。不过，此恒星继续以同样的引力作用到航天飞船上，使飞船继续围绕着形成的黑洞旋转。但是由于以下的问题，上述场景不是完全现实的。一个人离开恒星越远则引力越弱，所以作用在这位无畏的航天员脚上的引力总比作用到他头上的大。在恒星还未收缩到临界半径而形成事件视界之前，这力的差别就足以将我们的航天员拉成意大利面条那样，甚至将他撕裂（图6.5）！然而我们相信，在宇宙中存在大得多的天体，譬如星系的中心区域，它们遭受到引力坍缩而产生黑洞；一位在这样的物体上面的航天员在黑洞形成之前不会被撕开。事实上，当他到达临界半径时，不会有任何异样的感觉，甚至在通过永不回返的那一点时，都没注意到它。然而，随着这区域继续坍缩，只要在几个钟头之内，作用到他头上和脚上的引力之差会变得如此之大，以至于再将其撕裂。



10:59:59
航天员在 11:00:00
发出的信号将永远
不会到达航天飞船
黑洞的事件视界
11:00:00
时间
10:59:58
航天员在
一个坍缩
恒星的表
面着陆
10:59:57
观察当航天
员落入黑洞
时发出信号
的航天飞船

图6.4

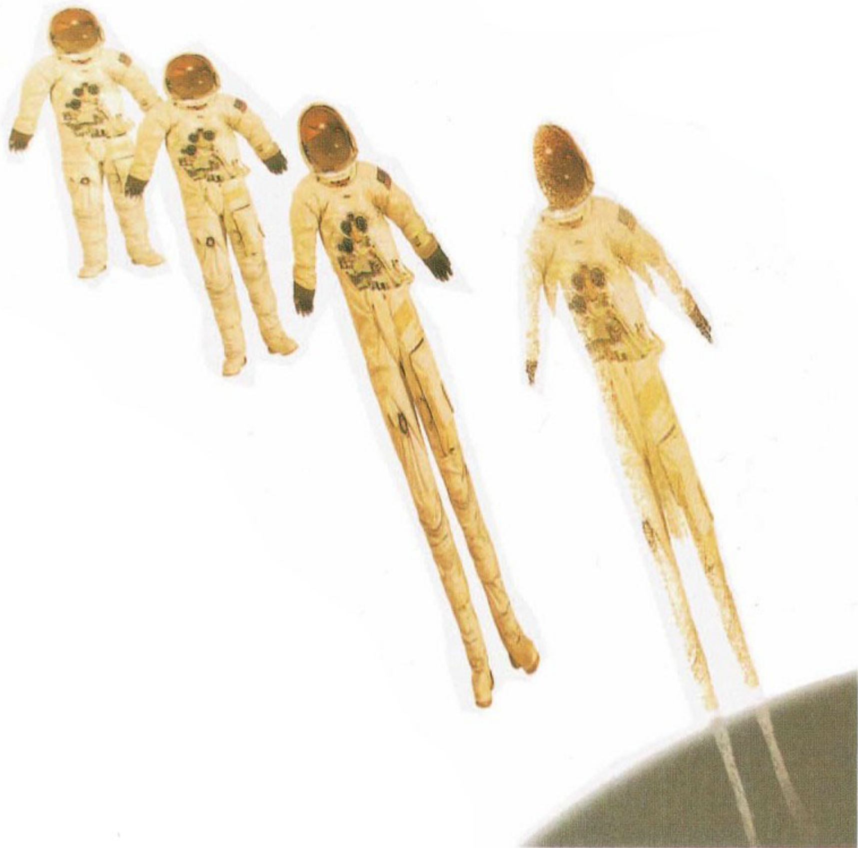


图6.5　一位航天员到达黑洞。当他接近事件视界时引力将其撕开

罗杰·彭罗斯和我在1965年和1970年之间的研究指出，根据广义相对论，在黑洞中必然存在密度和时空曲率无限大的奇点。这和时间开端时的大爆炸相当类似，只不过它是一个坍缩物体和航天员的时间终点而已。在此奇点，科学定律和我们预言将来的能力都崩溃了，然而，任何留在黑洞之外的观察者，将不会受到可预见性失效的影响，因为从奇点出发的，不管是光还是任何其他信号，都不能到达他那儿。这个非凡的事实导致罗杰·彭罗斯提出了宇宙监督假想，它可以被意译为："上帝憎恶裸奇点。"换言之，由引力坍缩所产生的奇点只能发生在像黑洞这样的地方，它在那里被事件视界体面地遮住而不被外界看见。严格地讲，这就是所谓弱的宇宙监督假想：它使留在黑洞外面的观察者不致受到发生在奇点处的可预见性崩溃的影响，但它对那位不幸落到黑洞里的可怜的航天员却是爱莫能助。





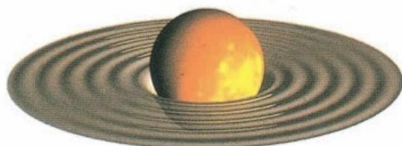












图6.6　一个收缩的恒星增长的引力场对周围空间的效应可以将想象的空间具体化为一张敏感的弹性的纸。物质越重，凹入处就越深。此处见到的最终引力内爆代表黑洞的奇性。

广义相对论方程存在一些解，我们的航天员在这些解中可能看到裸奇点：他也许能避免撞到奇点上去，相反的穿过一个“虫洞”来到宇宙的另一区域。看来这给在时空内的旅行提供了大的可能性。但是不幸的是，所有这些解似乎都是非常不稳定的；最小的干扰，譬如一个航天员的存在就会使之改变，以至于他还没能看到此奇点，就撞上去而终结了他的时间。换言之，奇点总发生在他的将来，而绝不会发生在他的过去。宇宙监督假想强的版本是说，在一个现实的解里，奇点总是要么整个存在于将来（如引力坍缩的奇点），要么整个存在于过去（如大爆炸）。我强烈地相信宇宙监督，这样我就和加州理工学院的基帕·索恩和

约翰·普勒斯基尔打赌，认为它总是成立的。由于找到了一些解的例子，在非常远处可以看得见其奇点，所以我在技术的层面上输了。这样，我必须遵照协约还清赌债，也就是必须把他们的裸露遮盖住。但是我可以宣布道义上的胜利，这些裸奇点是不稳定的：最小的干扰就会导致这些奇点消失，或者躲到事件视界后面去。所以它们在实际情形下不会发生。

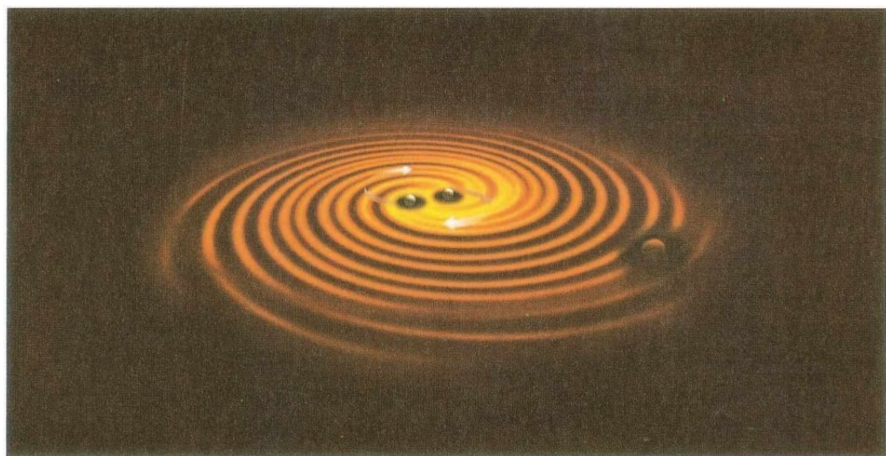


图6.7　由两个像上图表示的相互公转的恒星甚至黑洞可以产生强烈的引力波。在PSR 1913+16区域的观测清楚地表明，两个中子星因发射引力波而失去能量，因此它们以螺旋形轨道相互靠近。

事件视界，也就是时空中不可逃逸区域的边界，其行为犹如围绕着黑洞的单向膜：物体，譬如粗心的航天员，能通过事件视界落到黑洞里去，但是没有任何东西可以通过事件视界而逃离黑洞。（记住事件视界是企图逃离黑洞的光在时空中的路径，而且没有任何东西可以比光行进得更快。）人们可以将诗人但丁针对地狱入口所说的话恰到好处地应用于事件视界：“从这里进去的人必须抛弃一切希望。”任何东西或任何人，一旦进入事件视界，就会很快地到达无限致密的区域和时间的终点。

广义相对论预言，运动的重物会导致引力波的辐射，那是以光的速度旅行的空间曲率的涟漪。引力波和电磁场的涟漪光波相类似，但是要探测到它则困难得多。引力波引起邻近自由落体之间距离的非常微小的变化，由此可以观察到它。在美国、欧洲和日本正在建造一些检测器，将把十万亿亿（1后面跟21个0）分之一的位移，或者把在10英里距离中的比一个原子核还小的位移测量下来，就像光一样，引力波带走了发射

它们的物体的能量。因为任何运动中的能量都会被引力波的辐射带走，所以可以预料，一个大质量物体的系统最终会趋向于一种不变的状态。（这和扔一块软木到水中的情况相当类似：起先翻上翻下折腾了好一阵，但是随着涟漪将其能量带走，它最终平静下来。）例如，围绕着太阳公转的地球即产生引力波。其能量损失的效应就要改变地球的轨道，使之逐渐越来越接近太阳，最后撞到太阳上，归于一种不变的状态。在地球和太阳的情形下，能量损失率非常小——大约只能点燃一个小电热器。这意味着要用大约1000亿亿亿年地球才会撞到太阳上，没有必要立即为之担忧！地球轨道改变极其缓慢，根本观测不到。但几年以前，在称为PSR1913＋16（PSR表示“脉冲星”，一种特别的发射出射电波规则脉冲的中子星）的系统中观测到这同一效应。此系统由两个相互围绕着公转的中子星组成（图6.7），由于引力波辐射，它们的能量损失，使它们相互沿着螺旋线轨道靠近。J·H·泰勒和R·A·荷尔西由于对广义相对论的这一证实获得1993年的诺贝尔奖。大约3亿年后它们将会碰撞。它们在碰撞之前，将会公转得这么快速，发射出的引力波，足以让像LIGO这样的检测器接收到。

在恒星引力坍缩形成黑洞时，运动会快得多，这样携带走能量的速率就会高得多。因此不用太长的时间就会达到不变的状态。这最终的状态将会是怎样的呢？人们会以为，它将依赖于形成黑洞的恒星的所有复杂特征——不仅它的质量和转动速度，而且恒星不同部分的不同密度以及恒星内气体的复杂运动而如果黑洞就像坍缩形成它们的原先物体那样变化多端，那么一般来讲，对黑洞作任何预言都会非常困难。

然而，加拿大科学家威纳·伊斯雷尔（他生于柏林，在南非长大，在爱尔兰得到博士学位）在1967年使黑洞研究发生了彻底的改变。伊斯雷尔指出，根据广义相对论，非旋转的黑洞必须是非常简单的；它们是完美的球形，其大小只依赖于它们的质量，并且任何两个这样的同质量的黑洞必须等同。事实上，它们可以用爱因斯坦的特解来描述，这个解是在广义相对论发现后不久的1917年被卡尔·施瓦兹席尔德找到的起初许多人，其中包括伊斯雷尔本人，认为，既然黑洞必须是完美的球形，一个黑洞只能由一个完美球形物体坍缩形成。因此，任何实际的恒星——从来都不是完美的球形——只会坍缩形成一个裸奇点。

然而，对于伊斯雷尔的结果，一些人，特别是罗杰·彭罗斯和约翰·惠勒提倡一种不同的解释。他们论证道，牵涉恒星坍缩的快速运动表明，

其释放出来的引力波使之越来越接近于球形，到它终结于静态的时刻，就变成准确的球形。按照这种观点，任何非旋转恒星，不管其形状和内部结构如何复杂，在引力坍缩之后都将终结于一个完美的球形黑洞，其大小只依赖于它的质量。这种观点得到进一步计算的支持，并且很快就被大家接受。

伊斯雷尔的结果只处理了由非旋转物体形成的黑洞。1963年，新西兰人罗伊·克尔找到了广义相对论方程的描述旋转黑洞的一族解。这些“克尔”黑洞以恒常速度旋转，其大小与形状只依赖于它们的质量和旋转的速度。如果旋转为零，黑洞就是完美的球形，这解就和施瓦兹席尔德解一样：如果旋转不为零，黑洞在赤道附近就会鼓出去（正如地球或太阳由于旋转而鼓出去一样），而旋转得越快则鼓得越厉害（图6.8）。由此人们猜测，如将伊斯雷尔的结果推广到包括旋转物体的情形，则任何旋转物体坍缩形成黑洞后，将最后终结于由克尔解描述的一个稳态。

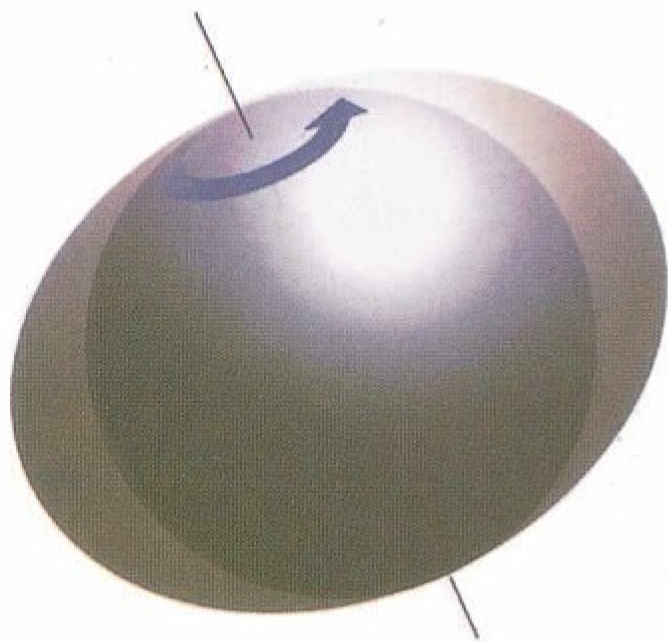


图6.8　当一个“克尔”黑洞的旋转加快时它的赤道附近鼓了出来。而零旋转的黑洞是完美的球形。

1970年，我在剑桥的一位同事和研究生同学布兰登·卡特为证明此猜

测跨出了第一步。他指出，假定一个稳态的旋转黑洞，正如一个自旋的陀螺那样，有一个对称轴，则它的大小和形状，只由它的质量和旋转速度决定。然后我在1971年证明了，任何稳态的旋转黑洞确实有这样的一个对称轴。最后在1973年，在伦敦国王学院任教的大卫·罗宾逊利用卡特和我的结果证明了这猜测是对的：这样的黑洞确实必须是克尔解。这样，在引力坍缩之后，一个黑洞必须最终演变成一种能够旋转，但是不能搏动的态。此外，它的大小和形状，只决定于它的质量和旋转速度，而与坍缩形成黑洞的原先物体的性质无关。此结果因如下一句格言而众所周知："黑洞没有毛。""无毛"定理具有巨大的实际重要性，因为它极大地限制了黑洞的可能类型。因此，人们可以制造可能包含黑洞的对象的详细模型，再将此模型的预言和观测相比较。因为在黑洞形成之后，我们所能测量的只是有关坍缩物体的质量和旋转速度，所以"无毛"定理还意味着，有关这物体的非常大量的信息，在黑洞形成时损失了（图6.9）。下一章我们将会理解这个意义。

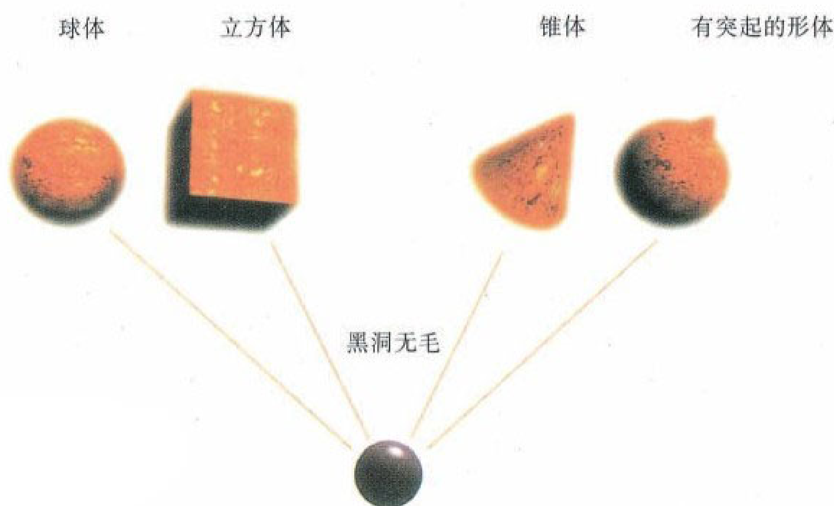


图6.9　黑洞的终态依赖于它的质量和转速。关于坍缩物体的大量信息被丢失了。

黑洞是科学史上极为罕见的情形之一，在没有任何观测到的证据说明其理论是正确的情形下，作为数学的模型被发展到非常详尽的地步。的确，这经常是黑洞反对者的主要论据：人们怎么能相信这样的物体，其仅有的证据是基于令人怀疑的广义相对论的计算呢？然而，1963年，加利福尼亚的帕罗玛天文台的天文学家马丁·施密特测量了在称为3C273（即是剑桥射电源编目第三类的273号）射电源方向的一个黯淡

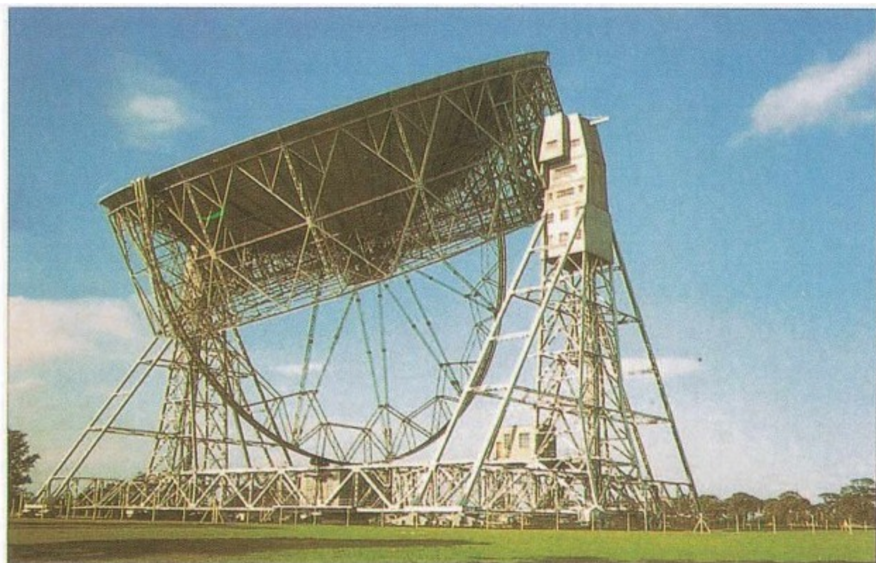
的类星体的红移。他发现引力场不可能引起这么大的红移——如果它是引力红移，这类星体质量必须这么大，并且离我们必须这么近，势必干扰太阳系中的行星轨道。这暗示这个红移是由宇宙的膨胀引起的，进而表明此物体离我们非常遥远。由于在这么远的距离还能观察到，它必须非常亮，也就是必须辐射出大量的能量。人们会想到，产生这么大能量的唯一机制看来不仅是一个恒星，而是一个星系的整个中心区域的引力坍缩。人们还发现了许多其他相似的类星体，它们都有很大的红移。但是它们都离开我们太远了，所以对之进行观察太困难了，不能给黑洞提供结论性的证据。



约瑟琳·贝尔·伯奈尔，是剑桥安东尼·赫维许小组的一个成员，她于1967年首先发现了脉冲星。

1967年，剑桥的一位研究生约瑟琳·贝尔·伯奈尔发现了天空发射出射电波的规则脉冲的物体，这对黑洞存在的预言带来了进一步的鼓舞，起初贝尔和她的导师安东尼·赫维许以为，他们可能和我们星系中的外星文明进行了接触！我清楚地记得在宣布他们发现的讨论会上，他们将这四个最早发现的源称为LGM1-LGM4，LGM表示“小绿人”（“Little Green Man”）的意思然而，最终他们和其他所有人都得到了不那么浪漫的结论，这些被称为脉冲星的物体，事实上是旋转的中子星。因为它们的磁场和周围物质复杂的相互作用，这些中子星发出射电波的脉冲。这对于写空间探险的作者而言是个坏消息，但对于我们这些当时相信黑洞的少

数人来说，是非常大的希望——这是中子星存在的第一个正的证据。中子星的半径大约为10英里，只是恒星变成黑洞的临界半径的几倍。如果一颗恒星能坍缩到这么小的尺度，预料其他恒星能坍缩到更小的尺度而成为黑洞，就是理所当然的了。



英国约德雷尔·邦克的射电望远镜，如此巨大的望远镜比光学搜索更容易认证作为强大的射电波源的脉冲星。

按照黑洞定义，它不能发出光，我们何以希望能检测到它呢？这有点像在煤库里找黑猫。庆幸的是，有一种办法。正如约翰·米歇尔在他1783年的先驱性论文中指出的，黑洞仍然将它的引力作用到周围的物体上。天文学家观测了许多系统，在这些系统中，两颗恒星由于相互之间的引力吸引而相互围绕着运动。他们还观察到了这样的系统，其中只有一颗可见的恒星围绕着另一颗看不见的伴星运动。人们当然不能立即得出结论说，这伴星即为黑洞——它可能仅仅是一颗黯淡的看不见的恒星而已。然而，这种系统中的一些，像叫做天鹅X-1的（图6.11）那样，也是强X射线源。对这现象的最好解释是，物质从可见星的表面被吹起来，当它落向不可见的伴星时，形成螺旋状运动（这和水从浴缸流出很相似），并且变得非常热，发出X射线（图6.12）。为了使这机制起作用，不可见物体必须非常小，像白矮星、中子星或黑洞那样。通过观测那颗可见星的轨道，人们可以确定不可见物体的最小的可能质量。在天鹅X-1的情形，这大约是太阳质量的6倍。按照昌德拉塞卡的结果，它的质量太大了，既不可能是白矮星，也不可能是中子星。因此，看来它只

能是一个黑洞。

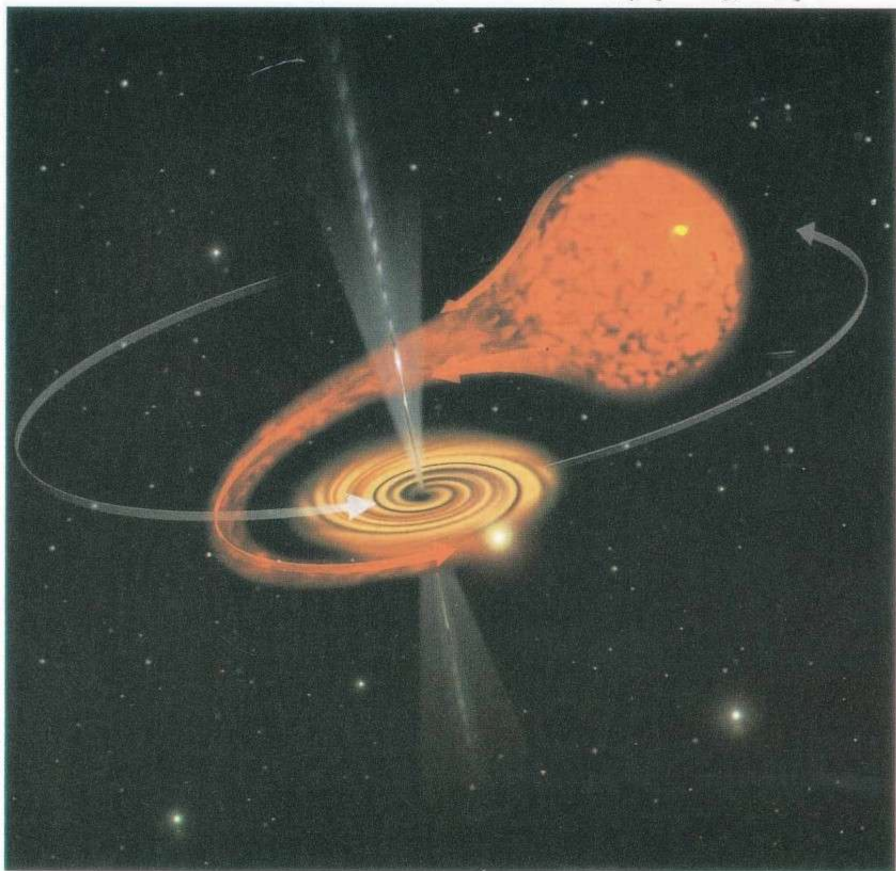


图6.10　一个正在公转的黑洞的强大引力场从它的伴星扯开物质，产生了朝事件视界旋进的吸积盘，以X射线形式的释放出的难以置信的能量是一个黑洞的表征。

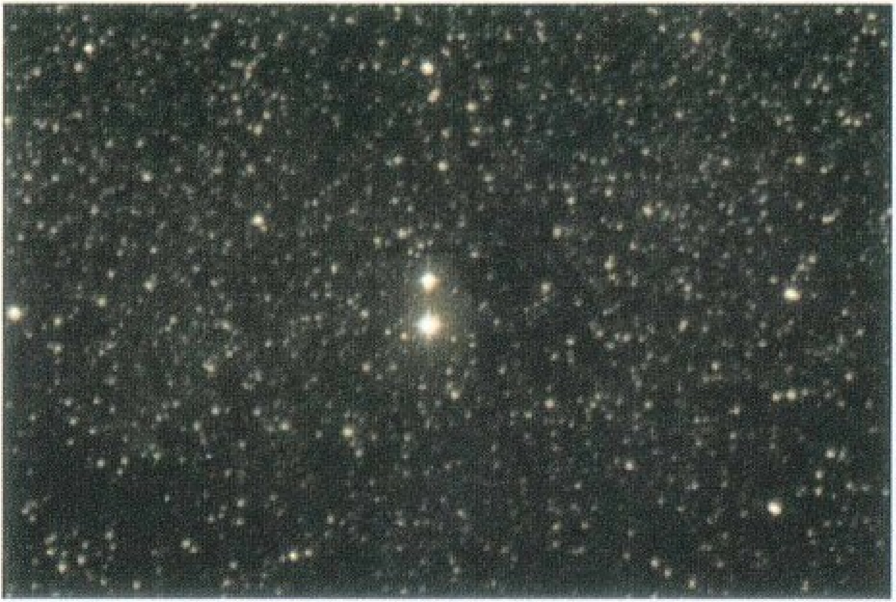


图6.11　照片中心附近的两个恒星更亮的那一个是天鹅X-1，它被认为包含一个黑洞和一个正常恒星，它们以图6.10描绘的方式相互公转。

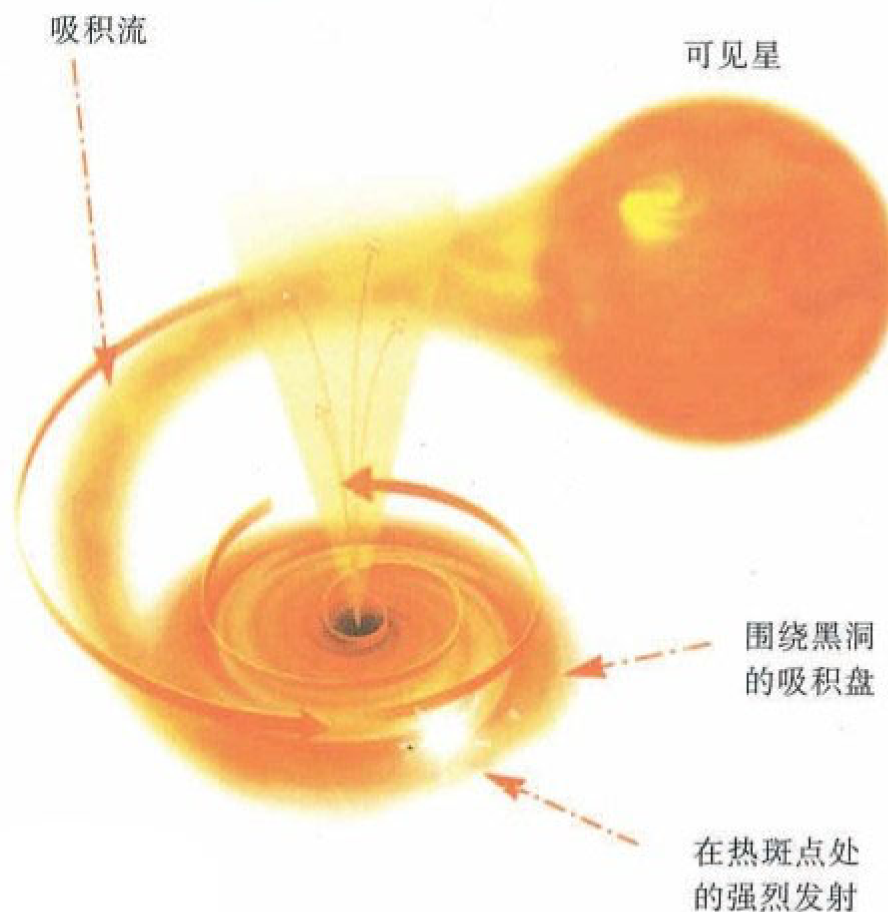


图6.12

还有其他不包含黑洞的解释天鹅X-1的模型，但是所有这些都相当牵强附会。黑洞看来是对该观测的仅有的真正自然的解释。尽管如此，我和加州理工学院的基帕·索恩打赌说，天鹅X-1不包含一个黑洞！这对我而言是一种保险的形式。我对黑洞作了许多研究，如果发现黑洞不存在，而这一切都成为徒劳。但在这种情形下，我将得到赢得打赌的安慰，他要给我订阅4年的《私家侦探》杂志。事实上，从我们打赌的1975年迄今，虽然天鹅X-1的情形并没有改变太多，但是人们已经积累了这么多对黑洞有利的其他观测证据，我只好认输。我进行了约定的赔偿，那就是给索恩订阅一年的《藏春阁》，这使他开放的妻子相当恼火。

现在，在像我们的星系和两个名叫麦哲伦星云的邻近星系的系统

中，我们还有几个类似天鹅X-1的黑洞的证据。然而，几乎可以肯定，黑洞的数量比这多得太多了！在宇宙的漫长历史中，很多恒星肯定烧尽了它们的核燃料并坍缩了：黑洞的数目甚至比可见恒星的数目要大得多。仅仅在我们的星系中，大约总共有1000亿颗可见恒星。这样巨大数量的黑洞的额外引力就能解释为何目前我们的星系以现有的速率转动：仅用可见恒星的质量是不足以说明这一点的我们还有某些证据表明，在我们星系的中心有一个大得多的黑洞，其质量大约是太阳的10万倍。星系中的恒星若十分靠近这个黑洞时，作用在它的近端和远端上的引力之差或潮汐力会将其撕开。它们的遗骸以及摆脱其他恒星的气体将落到黑洞上去。正如在天鹅X-1的情形那样，气体将以螺旋形轨道向里运动，并且被加热，虽然没有到那种程度。它没有热到足以发出X射线，但是它可以用来说明在星系中心观测到的非常致密的射电波和红外线源。

Whereas Stephen Hawking has such a large investment in General Relativity and Black Holes and desires an insurance policy, and whereas Kip Thorne likes to live dangerously without an insurance policy,

Therefore be it resolved that Stephen Hawking bets 1 year's subscription to "Penthouse" as against Kip Thorne's wager of a 4-year subscription to "Private Eye", that Cygnus X1 does not contain a black hole of mass above the Chandrasekhar limit.

Kip S. Thorne

Stephen Hawking

Witnessed ... December ...

Anne Zytkow Werner Israel

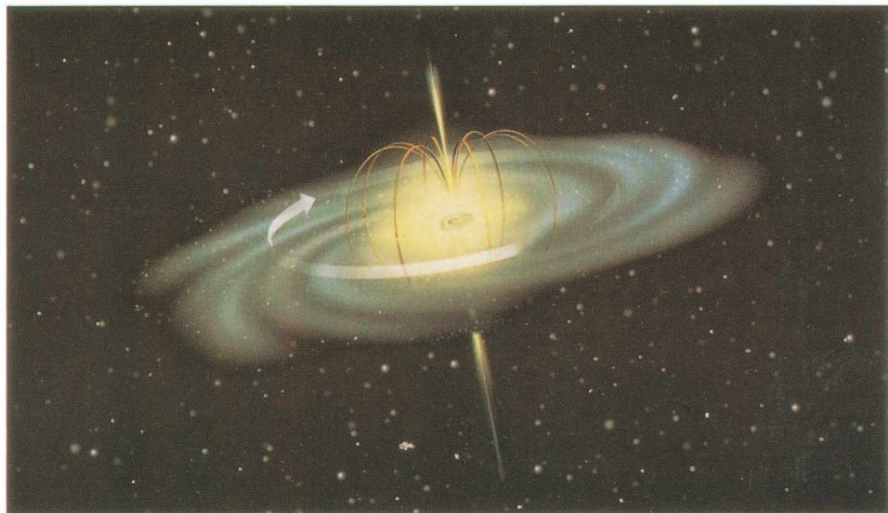
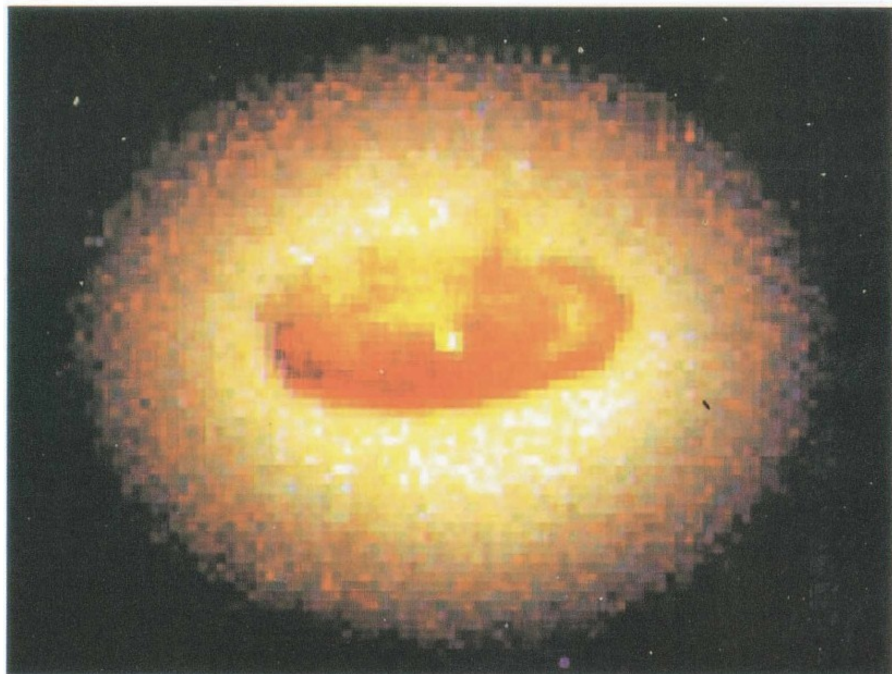


图6.13　在一个星系中心的超大黑洞和被它吸引的做涡旋运动的物质一起旋转，产生了巨大的磁场：它把非常高能的粒子聚焦成沿着黑洞旋转轴的射流。

人们认为，在类星体的中心是类似的，但质量更大的黑洞，其质量大约为太阳的1亿倍。例如，用哈勃望远镜对称为M　87的星系进行的观测揭示出，它含有直径130光年的气体盘，该盘围绕着20亿倍太阳质量的中心物体旋转。这只能是一个黑洞。只有落入此超重的黑洞的物质才能提供足够强大的能源，用以解释这些物体释放出的巨大能量。当物质旋入黑洞，它将使黑洞往同一方向旋转，使黑洞产生一个磁场，这个磁场和地球的磁场颇为相像。落入的物质会在黑洞附近产生能量非常高的粒子。该磁场是如此之强，能将这些粒子聚焦成沿着黑洞旋转轴，也即在它的北极和南极方向往外喷射的射流。在许多星系和类星体中确实观察到这类射流。人们还可以考虑存在质量比太阳质量小很多的黑洞的可能性。因为它们的质量比昌德拉塞卡极限低，所以不能由引力坍缩产生：这样小质量的恒星，甚至在耗尽了自己的核燃料之后，还能支持自己对抗引力。只有当物质由非常巨大的外界压力压缩成极端紧密的状态时，才能形成小质量的黑洞。一个巨大的氢弹可提供这样的条件：物理学家约翰·惠勒曾经计算过，如果将世界海洋里所有的重水制成一个氢弹，则它可以将中心的物质压缩到产生一个黑洞。（当然，那时没有一个人能残留下来观察它！）比较实在的一种可能性是：在极早期宇宙的高温和高压条件下可能产生这样小质量的黑洞。因为只有一个比平均值更紧密的小区域，才能以这样的方式被压缩形成一个黑洞，所以只有当早期宇宙不是完全光滑的和均匀时，这才有可能形成黑洞。但是我们知道，早期宇宙一定存在一些无规性，否则现在宇宙中的物质分布仍然会

是完全均匀的，而不能结块形成恒星和星系。



这是哈勃空间望远镜关于处女座中的称为N G C 4261的一个星系的图象。它显示了向一个大质量黑洞旋入的尘埃和气体的圆盘。基于旋转气体速度的计算暗示，中心物体具有12亿倍太阳的质量，但是它并不比我们的太阳系大很多。这张图象是在1996年1月拍摄的。

很清楚，为了说明恒星和星系的无规性是否导致形成相当数目的“太初”黑洞，依赖于早期宇宙中条件的细节。这样，如果我们能够确定现在有多少太初黑洞，我们就能对宇宙的极早期阶段了解很多。质量大于10亿吨（一座大山的质量）的太初黑洞，只能通过它们对其他可见物质或宇宙膨胀的影响被探测到。然而，正如我们将要在下一章看到的，黑洞毕竟不是真黑：它们像一个热体一样发热发光，它们越小则发热发光得越厉害。所以，看起来荒谬，而事实上却是，也许小的黑洞可以比大的黑洞更容易探测到！

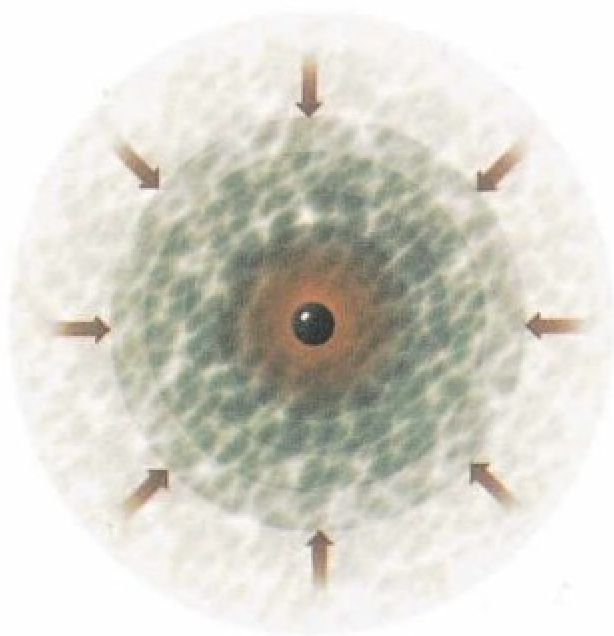


图6.14　太初黑洞是由外部而非内部的压力产生的。

第七章　黑洞不是这么黑的

在1970年以前，我关于广义相对论的研究，主要集中于是否存在一个大爆炸奇点。然而，同年11月我的女儿露西出生后不久的一个晚上，当我上床时，开始思考黑洞的问题。我的残废使得这个过程相当缓慢，这样我有大量时间。那时候还不存在关于时空的那些点是在黑洞之内还是在黑洞之外的准确定义。我已经和罗杰·彭罗斯讨论过将黑洞定义为不能逃逸到远处的事件集合的想法，这也就是现在被广泛接受的定义。它意味着，黑洞边界——即事件视界——是由刚好不能从黑洞逃逸，而只在边缘上永远盘旋的光线在时空里的路径形成的（图7.0。这有点像从警察那里逃开，但是仅仅维持比警察快一步，而不能彻底逃脱的情景！

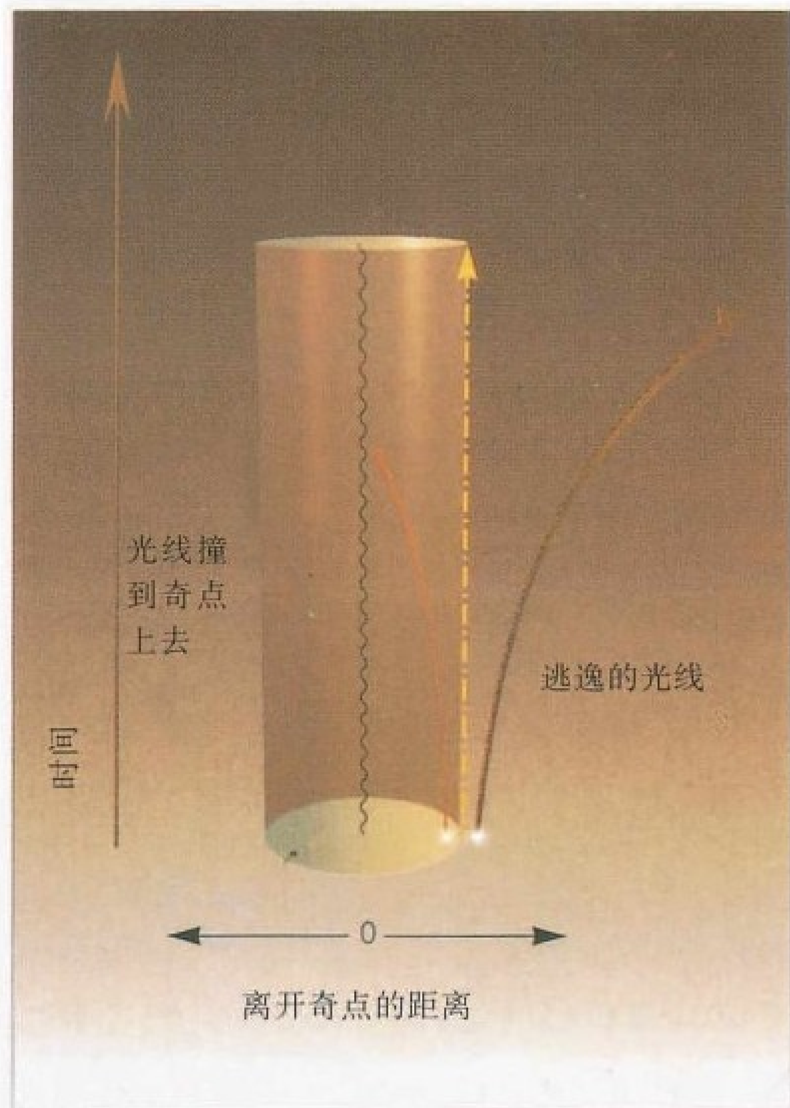


图7.1　黑洞的事件视界或者边界是由刚好不能从黑洞逃逸的光线组成的。

我忽然意识到，这些光线的路径永远不可能相互靠近。如果它们靠近，它们最终就必定相撞。这正如和另一个往相反方向逃离警察的人相遇一样——你们俩都会被抓住（或者，在这种情形下落到黑洞中去）。但是，如果这些光线被黑洞吞没，那它们就从未在黑洞的边界上呆过所以在事件视界上的光线的路径必须永远相互平行运动或相互散开。另一种看到这一点的方法是，事件视界，亦即黑洞边界，正像一个影子的边缘——一个即将临头的灾难的影子。如果你看到在远距离上的一个源，譬如太阳，投下的影子，就能明白边缘上的光线不会相互靠近。

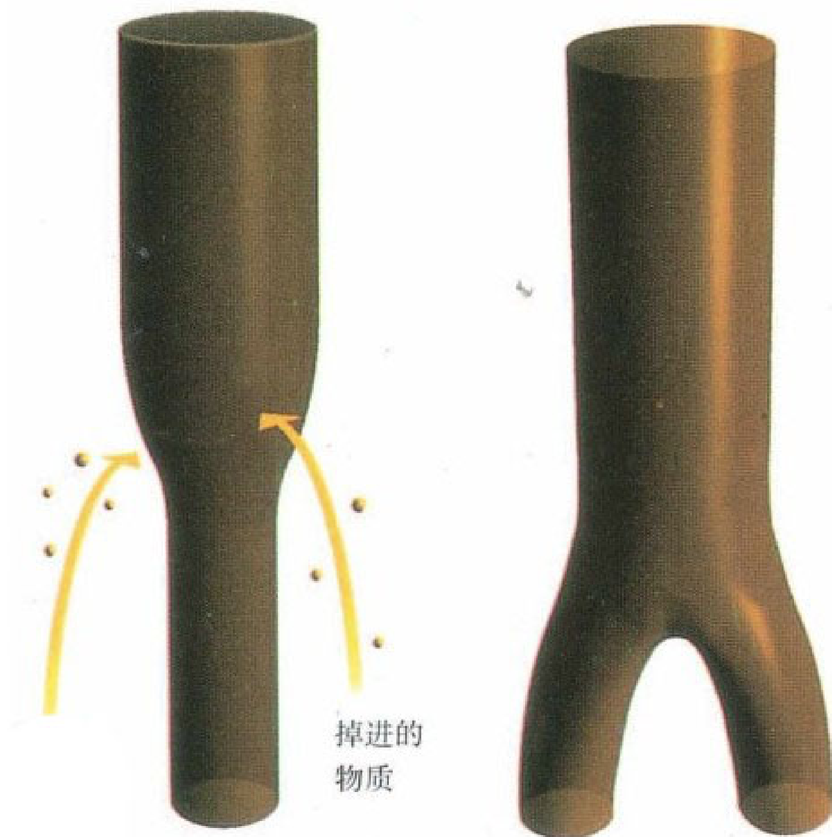


图7.2和图7.3　当物质落入黑洞，事件视界的面积增加在图7.3中两个黑洞碰撞产生了一个面积比原先两个黑洞的视界面积的和更大的事件视界。

如果从事件视界（亦即黑洞边界）来的光线永不相互靠近，则事件视界的面积可以保持不变或者随时间增大，但它永远不会减小——因为这意味着至少边界上的一些光线必须互相靠近。事实上，每当物质或辐射落到黑洞中去，这面积就会增大（图7.2）；或者如果两个黑洞碰撞并合并成一个单独的黑洞，这最后的黑洞的事件视界面积就会大于或等于原先黑洞事件视界面积的总和（图7.3）。事件视界面积的非减性质给黑洞的可能行为加上了重要的限制。我为我的发现如此激动，以至于当夜没睡多少。第二天，我给罗杰·彭罗斯打电话，他同意我的结果。我想，事实上他此前已经意识到了这个面积的性质。然而，他使用了稍微不同的黑洞定义。他没有意识到，假定黑洞已经终止于不随时间变化的状态，按照这两种定义，黑洞的边界并因此其面积都应是一样的。

人们非常容易从黑洞面积的非减行为联想起被叫做熵的物理量的行为。熵是测量一个系统的无序的程度。常识告诉我们，如果不进行外部干涉，事物总是倾向于增加它的无序度。（你只要停止保养房子就会看到这一点！）人们可以从无序中创造出有序来（例如你可以油漆房子），但是必须消耗精力或能量，这样减少了可利用的有序能量的数量。

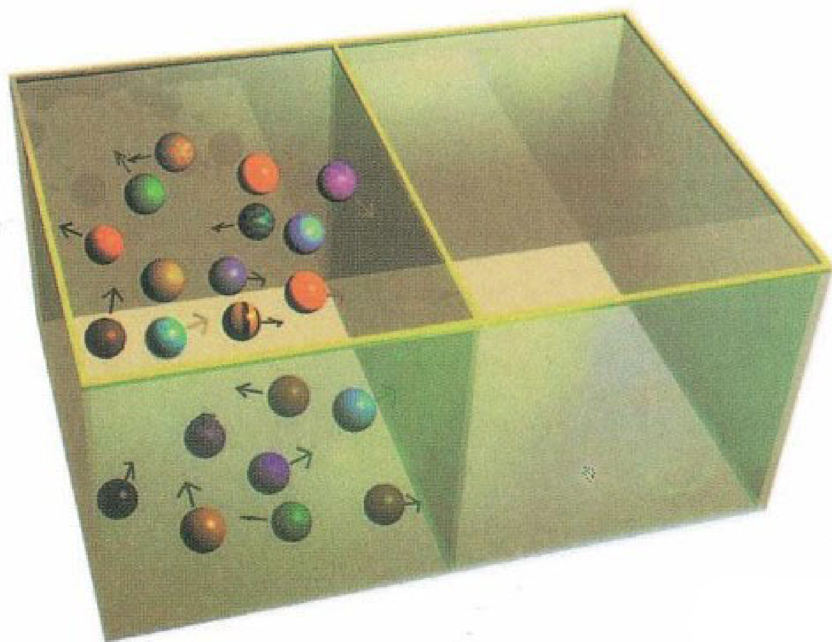


图7.4　充满了气体分子的一个盒子，用一块隔板将所有分子都限制在盒子的左半部。

热力学第二定律是这个观念的一个准确描述。它陈述道：一个孤立系统的熵总是增加的，并且将两个系统连接在一起时，其合并系统的熵大于所有单独系统熵的总和。譬如，考虑一盒气体分子的系统。分子可以认为是不断相互碰撞，并不断从盒子壁反弹回来的康乐球。气体的温度越高，分子运动得越快，这样它们撞击盒壁越频繁也越厉害，而且它们作用到壁上的向外的压力越大。假定初始时所有分子被一隔板限制在盒子的左半部（图7.4）。如果接着将隔板除去，这些分子将趋向散开并充满盒子的两半（图7.5）。在以后的某一时刻，所有这些分子偶尔会都呆在右半部或回到左半部，但占绝对优势的可能性是，分子的数目在左右两半大致相同。这种状态比原先的所有分子都在一个半部的状态更加无序。因此，人们说气体的熵增加了。类似地，假定我们从两个盒子开

始，将一个盒子充满氧分子，另一个盒子充满氮分子。如果把两个盒子连在一起并移去中间的壁，则氧分子和氮分子就开始混合。在后来的时刻，最可能的状态是两个盒子都充满了相当均匀的氧分子和氮分子的混合物。这种状态比原先分开的两盒的初始状态更无序，即具有更大的熵。

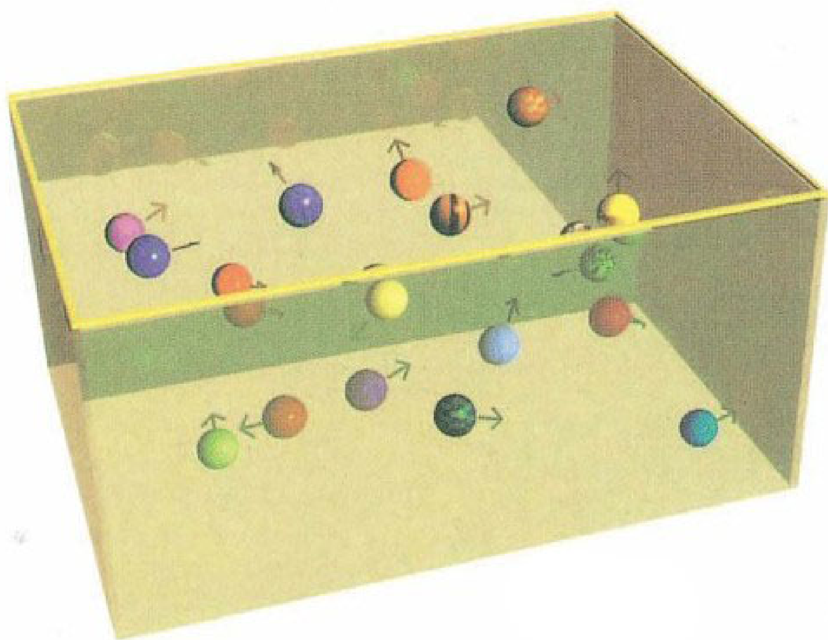


图7.5　随着隔板的移开，分子散开成占据整个盒子的更低序的状态。

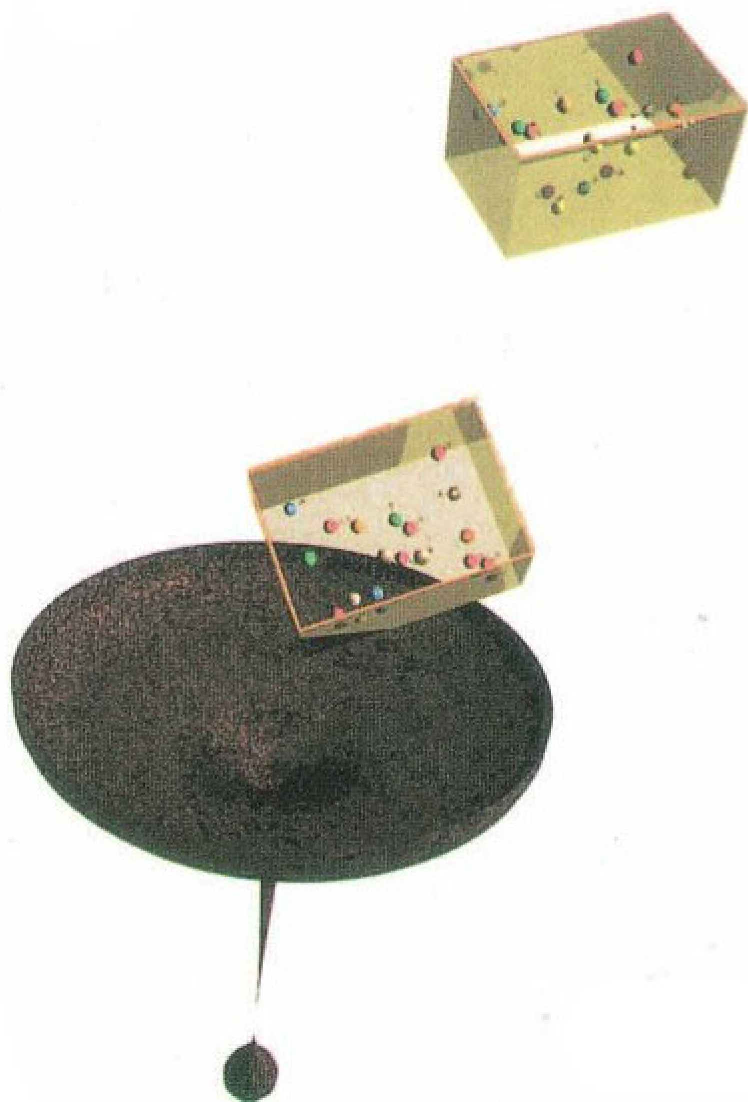
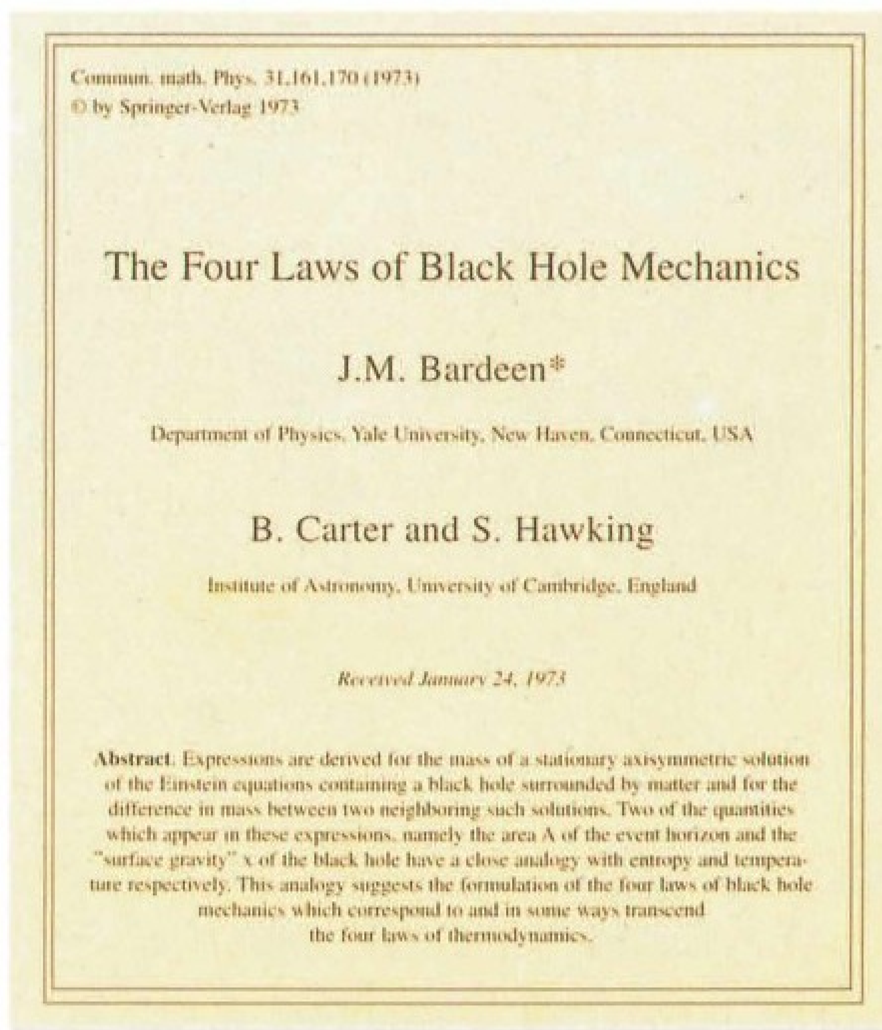


图7.6　一个装有气体的盒子落入黑洞。黑洞之外的总熵当盒子进入黑洞时下降，尽管宇宙（包含该黑洞）的总熵很可能保持常量。

和其他科学定律，譬如牛顿引力定律相比，热力学第二定律的状况相当不同。例如，它只是在绝大多数的而非所有情形下成立。在以后某一时刻，我们第一个盒子中的所有气体分子在盒子的一半被发现的概率只有几万亿分之一，但它们可能发生，然而，如果附近有一黑洞，似乎存在一种非常容易的方法违反第二定律：只要将一些具有大量熵的物体，譬如一盒气体，抛进黑洞里。黑洞之外物体的总熵就会减少（图

7.6）。当然，人们仍然可以说，包括黑洞里的熵的总熵没有降低——但是由于没有办法看到黑洞里面，我们不能知道里面物体的熵为多少。如果黑洞具有某一特征，黑洞外的观察者因之可知道它的熵，并且只要携带熵的物体一落入黑洞，它就会增加，那将是很美妙的。紧接着上述的黑洞面积定理的发现，即只要物体落入黑洞，它的事件视界面积就会增加，普林斯顿大学一位名叫雅可布·柏肯斯坦的研究生提出，事件视界的面积即是黑洞熵的量度。由于携带熵的物质落到黑洞中时，它的事件视界的面积会增加，这样就使黑洞外物质的熵和事件视界面积的和永远不会降低。


Commun. math. Phys. 31, 161-170 (1973)
© by Springer-Verlag 1973

The Four Laws of Black Hole Mechanics

J.M. Bardeen*

Department of Physics, Yale University, New Haven, Connecticut, USA

B. Carter and S. Hawking

Institute of Astronomy, University of Cambridge, England

Received January 24, 1973

Abstract. Expressions are derived for the mass of a stationary axisymmetric solution of the Einstein equations containing a black hole surrounded by matter and for the difference in mass between two neighboring such solutions. Two of the quantities which appear in these expressions, namely the area A of the event horizon and the "surface gravity" κ of the black hole have a close analogy with entropy and temperature respectively. This analogy suggests the formulation of the four laws of black hole mechanics which correspond to and in some ways transcend the four laws of thermodynamics.

在1972年撰写的论文“黑洞力学的四个定律”的题页。

看来在大多数情况下，这个建议防止热力学第二定律受到违背。然而还有一个致命的瑕疵。如果黑洞具有熵，那它也应该有温度。但具有特定温度的物体必须以一定的速率发出辐射。从日常经验知道：只要将火钳在火上加热，它就会发光发热，发出辐射。但在低温下物体也发出辐射；只是因为辐射量相当小，在通常情况下没有注意到。为了防止违反热力学第二定律，这辐射是必需的。所以黑洞必须发出辐射。但正是按照其定义，黑洞被认为是不发出任何东西的物体。因此，黑洞的事件视界的面积似乎不能认为是它的熵。1972年，我和布兰登·卡特以及美国同事詹姆·巴丁合写了一篇论文，在论文中我们指出，虽然在熵和事件视界的面积之间存在许多相似点，但还存在着这个致命的困难。我必须承认，写此文章的部分动机是因为被柏肯斯坦激怒，我觉得他滥用了我的事件视界面积增加的发现。然而，最后发现，他基本上还是正确的，虽然是在一种他肯定没有预料到的情形下。

1973年9月我访问莫斯科时，和苏联两位最主要的专家雅可夫·捷尔多维奇和亚历山大·斯塔拉宾斯基讨论黑洞问题。他们说服我，按照量子力学不确定性原理，旋转黑洞应该产生并辐射粒子。在物理学的基础上，我相信他们的论点，但是不喜欢他们计算辐射所用的数学方法。因此，我着手设计一种更好的数学处理方法，并于1973年11月底在牛津的一次非正式讨论会上将其公布于众。那时我还没计算出实际上有多少辐射。我预料要发现的正是捷尔多维奇和斯塔拉宾斯基预言的从旋转黑洞发出的辐射。然而，当我做了计算，使我既惊奇又恼火的是，我发现甚至非旋转黑洞显然也应以不变速率产生和发射粒子。起初我以为这种辐射表明我使用的一种近似无效。我担心如果柏肯斯坦发现了这个情况，他就一定会用它去进一步支持他关于黑洞熵的思想，而我仍然不喜欢这种思想。然而，我越仔细推敲，越觉得这近似其实应该有效。但是，最后使我信服这辐射是真实的理由是，这辐射的粒子谱刚好是一个热体辐射的谱，而且黑洞以刚好防止第二定律被违反的正确速率发射粒子。此后，其他人用多种不同的形式重复了这个计算。他们所有人都证实了黑洞必须如同一个热体那样发射粒子和辐射，其温度只依赖于黑洞的质量——质量越大则温度越低。

我们知道，任何东西都不能从黑洞的事件视界之内逃逸出来，黑洞怎么可能发射粒子呢？量子理论给我们的回答是，粒子不是从黑洞里面出来的，而是从紧靠黑洞的事件视界的外面的“空虚的”空间来的！我们可以用以下的方法去理解这个：我们以为是“空虚的”空间不能是完全空

的，因为那就意味着诸如引力场和电磁场的所有场都必须刚好是零。然而场的数值和它的时间变化率如同粒子的位置和速度那样：不确定性原理意味着，人们对其中的一个量知道得越准确，则对另一个量知道得越不准确。所以在空虚的空间里场不可能严格地被固定为零，因为那样它就既有准确的值（零）又有准确的变化率（也是零）。场的值必须有一定的最小的不确定性量或量子起伏。人们可以将这些起伏理解为光或引力的粒子对，它们在某一时刻同时出现，相互离开，然后又相互靠近，而且相互湮灭（图7.7）。这些粒子正如同携带太阳引力的虚粒子：它们不像真的粒子那样，能用粒子探测器直接观察到。然而，它们的间接效应，例如原子中的电子轨道能量发生的微小变化，可被测量出，并和理论预言一致的程度，令人十分惊讶。不确定性原理还预言了存在类似的虚的物质粒子对，例如电子对和夸克对。然而在这种情形下，粒子对的一个成员为粒子，而另一成员为反粒子（光和引力的反粒子和粒子相同）。

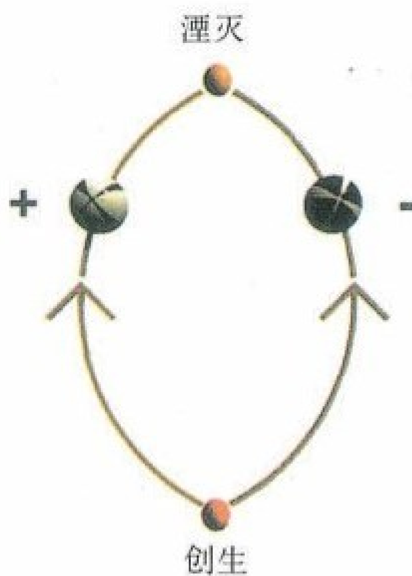


图7.7　“空”的空间充满虚粒子反粒子对：它们被一同创生，相互离开，然后再回到一起并且湮灭。

因为能量不能无中生有，所以粒子反粒子对中的一个伴侣具有正能量，而另一个具有负能量。由于在正常情况下实粒子总是具有正能量，所以具有负能量的那一个粒子注定是短命的虚粒子。因此，它必须找到它的伴侣并与之相互湮灭。然而，因为实粒子要花费能量抵抗大质量物

体的引力吸引才能将其推到远处，一颗实粒子的能量在接近大质量物体时比在远离时更小。正常情况下，这粒子的能量仍然是正的。但是黑洞里的引力是如此之强，甚至在那里实粒子的能量都可以是负的。因此，如果存在黑洞，带有负能量的虚粒子落到黑洞里可能变成实粒子或实反粒子。这种情形下，它不再需要和它的伴侣相互湮灭了。它被抛弃的伴侣也可以落到黑洞中去。或者由于它具有正能量，也可以作为实粒子或实反粒子从黑洞的邻近逃走（图7.8）。对于一个远处的观察者而言，它就显得是从黑洞发射出来的粒子一样。黑洞越小，负能粒子在变成实粒子之前必须走的距离越短，这样黑洞发射率和表观温度也就越大。

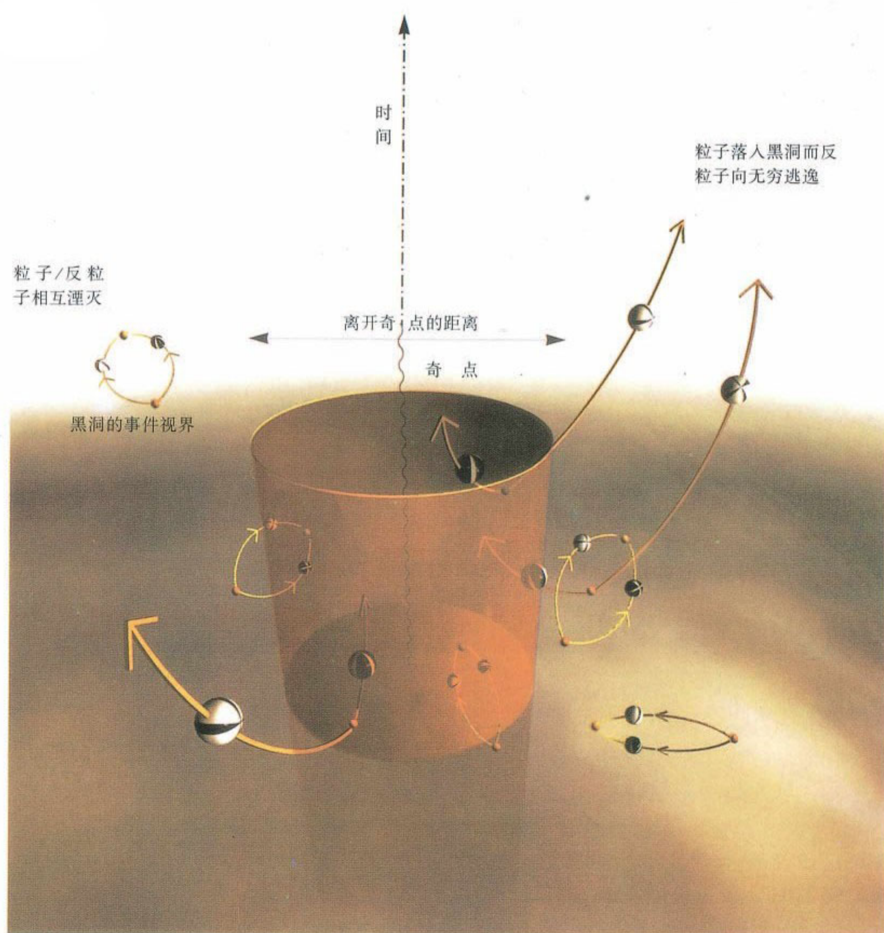


图7.8　如果黑洞存在，虚对的一个成员会落入黑洞并且成为实粒子另一成员会从黑洞邻近逃逸。

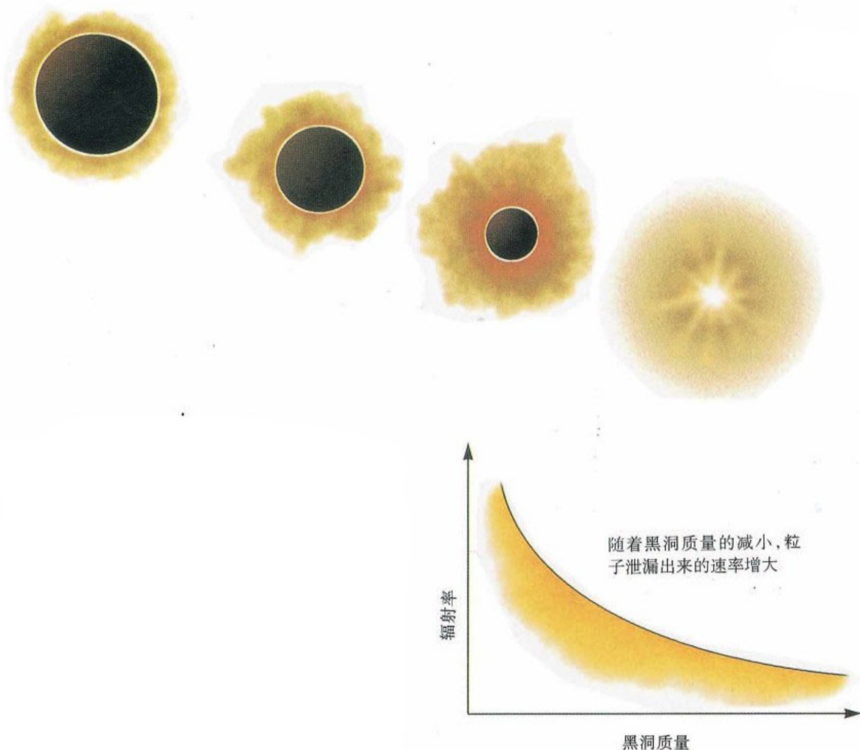


图7.9　黑洞发出辐射，因此丧失能量和质量，黑洞变得更小，其辐射率随之增大。人们认为，黑洞最终在一次巨大的爆炸中完全消失。

辐射出去的正能量会被落入黑洞的负能粒子流平衡。按照爱因斯坦方程$E=mc^2$（E是能量，m是质量，c为光速），能量和质量成正比。因此，往黑洞去的负能量流减小它的质量。随着黑洞损失质量，它的事件视界面积变得更小，但是它发射出的辐射的熵过量地补偿了黑洞的熵的减少，所以第二定律从未被违反过。

还有，黑洞的质量越小，其温度就越高。这样，随着黑洞损失质量，它的温度和发射率增加，因而它的质量损失得更快（图7.9）。当黑洞的质量最后变得极小时会发生什么，人们并不很清楚。但是最合理的猜想是，它最终将会在一次巨大的，相当于几百万颗氢弹爆炸的辐射暴中消失殆尽。

一个具有几倍太阳质量的黑洞只具有一千万分之一度的绝对温度。这比充满宇宙的微波辐射的温度（大约2.7K）要低得多，所以这种黑洞的辐射比它吸收的还要少。如果宇宙注定继续永远膨胀下去，微波辐射

的温度就会最终减小到比这黑洞的温度还低，它就开始损失质量。但是即使到了那时候，它的温度是如此之低，以至于要用100亿亿亿亿亿亿亿亿年（1后面跟66个0）才全部蒸发完。这比宇宙的年龄长得多了，宇宙的年龄大约只有100亿至200亿年（1或2后面跟10个0）。另一方面，正如第六章提及的，在宇宙的极早期阶段存在由于无规性引起的坍缩而形成的质量极小的太初黑洞。这样的小黑洞会有高得多的温度，并以大得多的速率发出辐射。具有10亿吨初始质量的太初黑洞的寿命大体和宇宙的年龄相同。初始质量比这小的太初黑洞应该已蒸发完毕，但那些比这稍大的黑洞仍在辐射出X射线以及伽马射线。这些X射线和伽马射线像光波，只是波长短得多。这样的黑洞几乎不配这黑的绰号：它们实际上是白热的，正以大约1万兆瓦的功率发射能量。

一个这样的黑洞可以开动10个大型的发电站，只要我们能够驾驭黑洞的功率就好了。然而，这是非常困难的：这黑洞把和一座山差不多的质量压缩成比万亿分之一英寸，亦即一个原子核的尺度还小！如果你在地球表面上有这样的一个黑洞，就无法阻止它透过地面落到地球的中心。它会穿过地球而来回振动，直到最后停在地球的中心。所以仅有的放置这样一个黑洞并利用其发射出的能量的地方是围绕着地球的轨道，而仅有的使它围绕地球公转的办法是，用在它之前的一个大质量的吸引力去拖它，这和在驴子前面放一根胡萝卜颇为相象（图7.10）至少在最近的将来，这个设想并不现实。

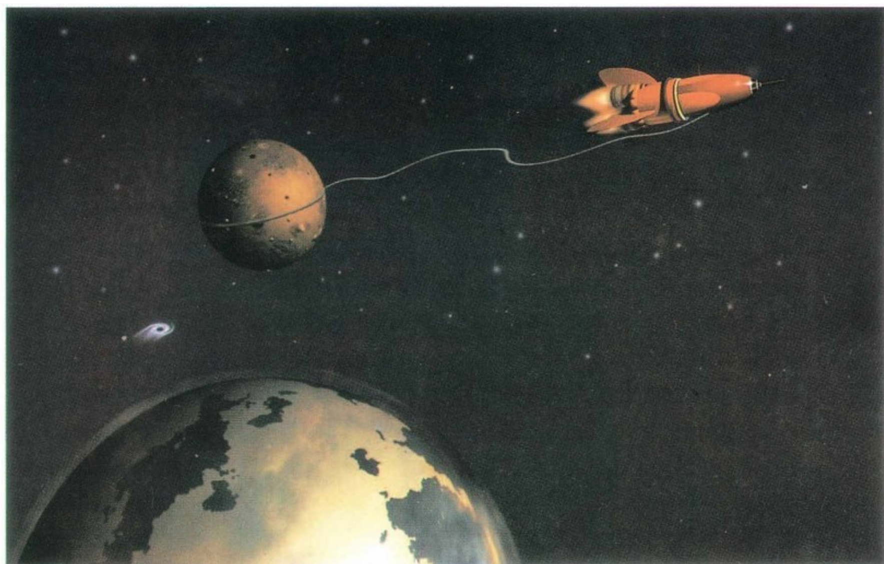


图7.10

但是，即使我们不能驾驭来自这些太初黑洞的辐射，我们观测到它们的机遇又如何呢？我们可以寻找太初黑洞在其主要生存期里发出的伽马射线辐射。虽然大部分黑洞在很远以外的地方，从它们来的辐射非常弱，但是从它们全体来的总辐射是可以检测到的。我们确实观察到这样的一个伽马射线背景：图7.11表示观察到的强度随频率（每秒波动的次数）的变化。然而，这个背景可以，并且大概是由除了太初黑洞以外的过程产生的。图7.11中的点线指出，如果每立方光年平均有300个太初黑洞，它们所发射的伽马射线的强度应如何随频率变化。因此可以说，伽马射线背景的观测并没给太初黑洞提供任何肯定的证据。但它们明确告诉我们，在宇宙中平均每立方光年不可能有多于300个太初黑洞。这个极限表明，太初黑洞最多只能构成宇宙中一百万分之一的物质。

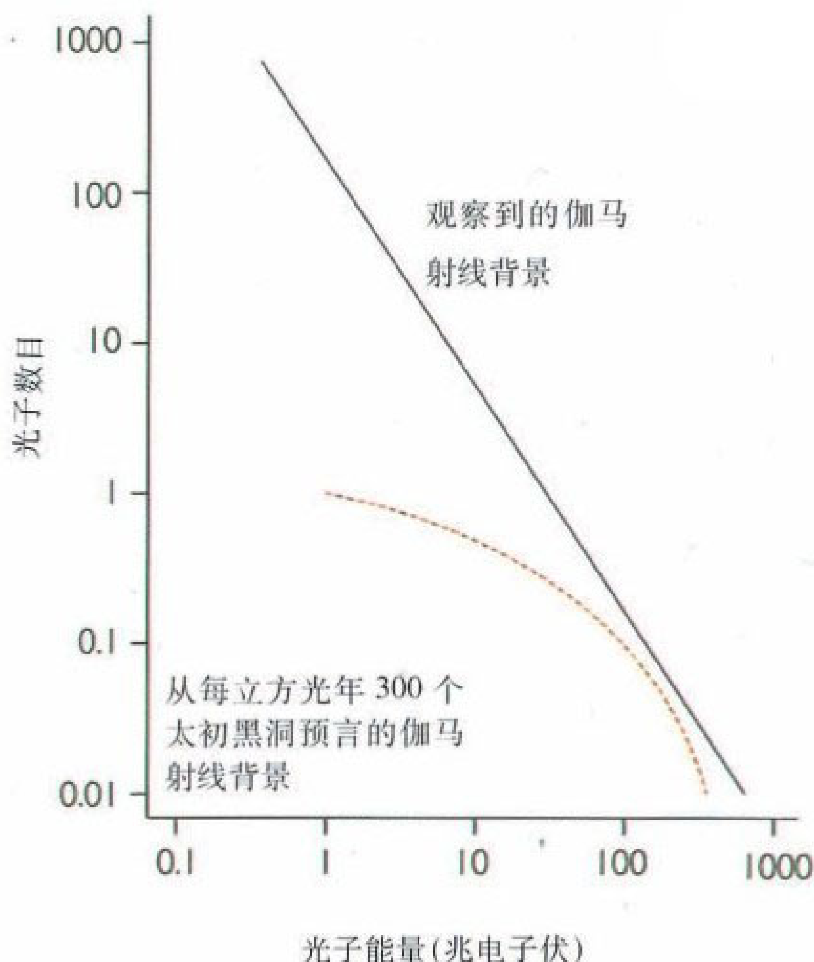


图7.11

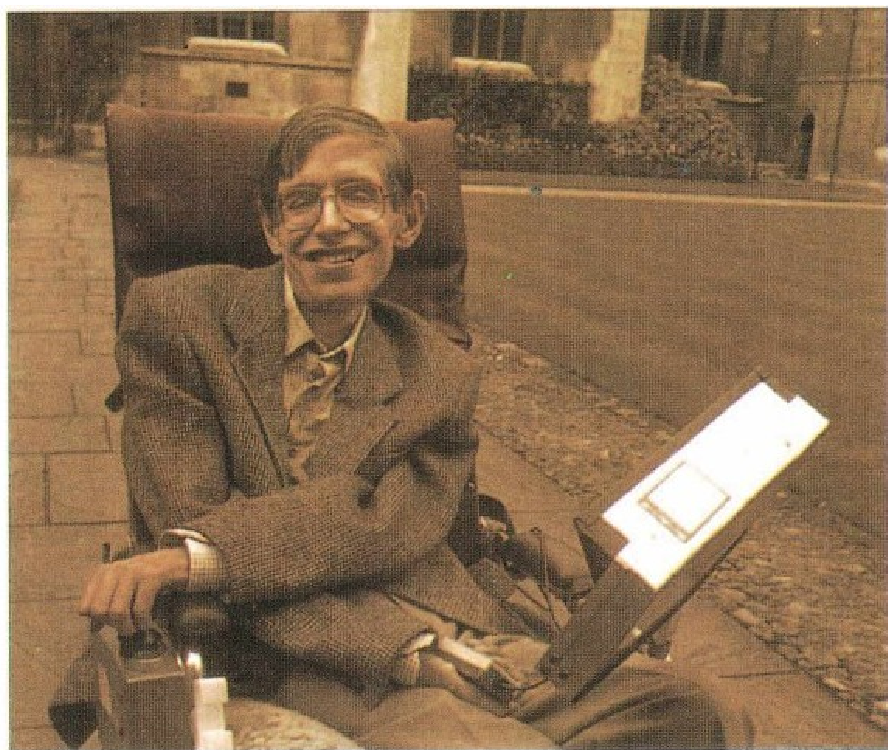
由于太初黑洞是如此稀罕，似乎不太可能存在一个近到我们可以将其当做一个单独的伽马射线源来观察的黑洞。但是由于引力会将太初黑洞往任何物体处拉近，所以它们在星系里面和附近应该会更稠密得多。虽然伽马射线背景告诉我们，平均每立方光年不可能有多于300个太初黑洞，但它并没有告诉我们，太初黑洞在我们星系中有多么普遍。譬如讲，如果它们的密度比这个普遍100万倍，则离开我们最近的黑洞可能大约在10亿千米远，或者大约是已知的最远的行星——冥王星那么远。在这个距离上去探测黑洞恒定的辐射，即使其功率为1万兆瓦，仍是非常困难的。为了观测到一个太初黑洞，人们必须在合理的时间间隔里，譬如一星期，从同方向检测到几个伽马射线量子。

否则，它们仅可能是背景的一部分。因为伽马射线有非常高的频率，从普朗克量子原理得知，每一伽马射线量子都具有非常高的能量，这样甚至辐射1万兆瓦都不需要许多量子。而要观测到从冥王星这么远来的这些稀少的粒子，需要一个比任何迄今已经建造的更大的伽马射线探测器。况且，由于伽马射线不能穿透大气层，此探测器必须放置到太空。

当然，如果一颗像冥王星这么近的黑洞已达到它生命的末期并要爆炸开来，很容易检测其最后辐射暴。但是，如果一个黑洞已经发射了100亿至200亿年，不在过去或将来的几百万年里，而是在未来的若干年里到达它生命终点的可能性真是微不足道！所以在你的研究津贴用光之前，为了有一合理的机会看到爆炸，必须找到在大约1光年距离之内检测任何爆炸的方法。事实上，原先建造来监督违反禁止核试验条约的卫星检测到了从太空来的伽马射线暴。这些每个月似乎发生16次左右，并且大体均匀地分布在天空的所有方向上。这表明它们起源于太阳系之外，否则的话，我们可以预料它们要集中于行星轨道面上。这种均匀分布还表明，这些伽马射线源要么处于银河系中离我们相当近的地方，要么就在它的外围的宇宙学距离之处，因为否则的话，它们又会集中于星系的平面附近。在后者的情形下，产生伽马射线暴所需的能量实在太大，微小的黑洞根本提供不起。但是如果这些源以星系的尺度衡量和我们邻近，那就可能是正在爆发的黑洞。我非常希望这种情形成真，但是我必须承认，还可以用其他方式来解释伽马射线暴，例如中子星的碰撞。未来几年的新观测，尤其是像LIGO这样的引力波探测器，应该能使我们发现伽马射线暴的起源。

即使对太初黑洞的寻求证明是否定的，看来可能会是这样，仍然给了我们关于极早期宇宙的重要信息。如果早期宇宙曾经是混沌或不规则的，或者如果物质的压力曾经很低，可以预料到会产生比我们由观测伽马射线背景设下的极限多许多的太初黑洞。只有当早期宇宙是非常光滑和均匀的，并有很高的压力，人们才能解释为何没有可观数目的太初黑洞。

黑洞辐射的思想是这种预言的第一例，它以基本的方式依赖于本世纪两个伟大理论，即广义相对论和量子力学。因为它推翻了已有的观点，所以一开始就引起了许多反对：“黑洞怎么能辐射东西？”当我在牛津附近的卢瑟福-阿普顿实验室的一次会议上，第一次宣布我的计算结果时，受到了普遍质疑。我讲演结束后，会议主席伦敦国王学院的约翰·泰勒宣布这一切都是毫无意义的。他甚至为此还写了一篇论文。然而，最终包括约翰·泰勒在内的大部分人都得出结论：如果我们关于广义相对论和量子力学的其他观念是正确的，那么黑洞必须像热体那样辐射。这样，即使我们还不能找到一个太初黑洞，大家相当普遍地同意，如果找到的话，它必须正在发射出大量的伽马射线和X射线。



史蒂芬·霍金教授在剑桥，当时他正在著述《时间简史》初版。

黑洞辐射的存在似乎意味着，引力坍缩不像我们曾经认为的那样是最终的、不可逆转的。如果一个航天员落到黑洞中去，黑洞的质量将增加，但是最终这额外质量的等效能量将会以辐射的形式回到宇宙中去（图7.12）。这样，此航天员在某种意义上被“再循环”了。然而，这是一种非常可怜的不朽，因为当航天员在黑洞里被撕开时，他的任何个人的时间的概念几乎肯定都达到了终点！甚至最终从黑洞辐射出来的粒子的种类，一般来说都和构成这航天员的不同：这航天员所遗留下来的仅有特征是他的质量或能量。



图7.12　一个落入黑洞的航天员将最终被再循环为当黑洞蒸发时发射出来的粒子和辐射。

当黑洞的质量大于几分之一克时，我用以推导黑洞辐射的近似应是很有效的。但是，当黑洞在它的生命晚期，质量变得非常小时，这近似就失效了。最可能的结果看来是，它至少从宇宙的我们这一区域消失了，带走了航天员和可能在它里面的任何奇点（如果其中确有一个奇点的话）。这是量子力学能够去掉广义相对论预言的奇点的第一个迹象。然而，我和其他人在1974年使用的方法不能回答诸如在量子引力论中是否会发生奇性的问题。因此，从1975年以来，根据理查德·费恩曼对于历史求和的思想，我开始推导一种更强有力的量子引力论方法。这种方法对宇宙以及其诸如航天员之类的内容的开端和终结给出的答案，将在以下两章叙述。我们将会看到，虽然不确定性原理对于我们所有的预言的准确性都加上了限制，同时它却可以排除掉发生在时空奇点处的基本的不可预言性。

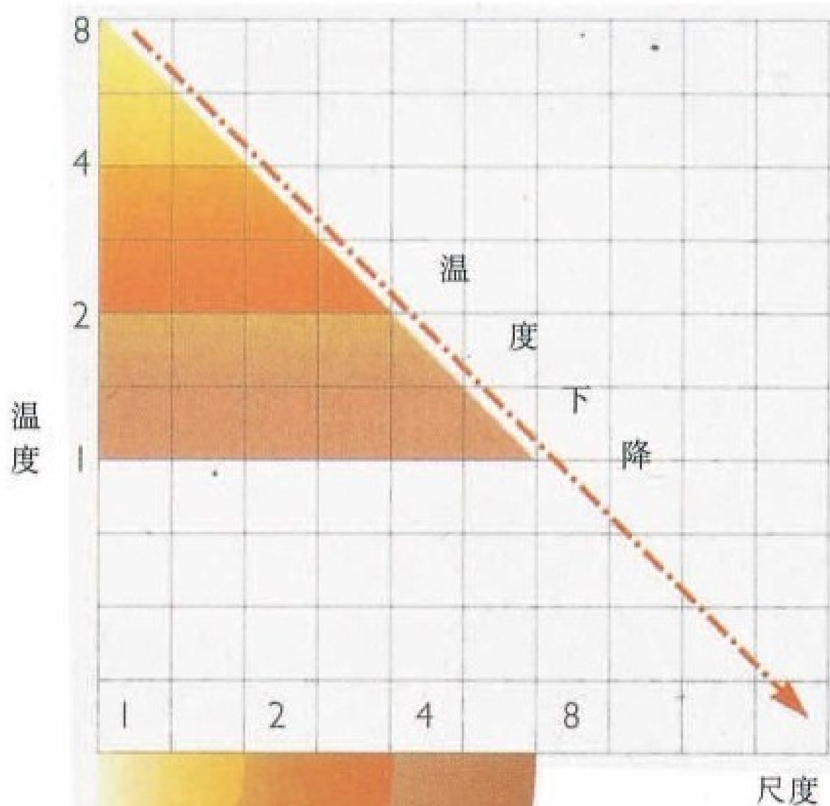
第八章　宇宙的起源和命运

从爱因斯坦广义相对论本身就能预言：时空在大爆炸奇点处开始，并会在大挤压奇点处（如果整个宇宙坍缩的话）或在黑洞中的一个奇点处（如果一个局部区域，譬如恒星坍缩的话）结束。任何落进黑洞的东西都会在奇点处毁灭，在外面只能继续感觉到它的质量的引力效应。另一方面，当考虑量子效应时，物体的质量和能量似乎会最终回到宇宙的其余部分，黑洞和在它当中的任何奇点会一道蒸发掉并最终消失。量子力学对大爆炸和大挤压奇点也能有同等戏剧性的效应吗？在宇宙的极早或极晚期，当引力场如此之强，量子效应不能不考虑时，究竟会发生什么？宇宙究竟是否有一个开端或终结？如果有的话，它们是什么样子的？



1981年作者和教皇保罗会面。

我在整个70年代主要研究黑洞，但在1981年参加在梵蒂冈由耶稣会组织的宇宙学会议时，我对于宇宙的起源和命运问题的兴趣被重新唤起。当天主教会试图对科学的问题发号施令，并宣布太阳围绕着地球运动时，对伽利略犯下了严重的错误。几个世纪后的现在，它决定邀请一些专家做宇宙学问题的顾问。在会议的尾声，教皇接见所有与会者。他告诉我们，在大爆炸之后的宇宙演化是可以研究的，但是我们不应该去过问大爆炸本身，因为那是创生的时刻，因而只能是上帝的事务。我心中窃喜，看来他并不知道，我刚在会议上作过的演讲的主题——时空有限而无界的可能性，这意味着它没有开端、没有创生的时刻。我不想去分享伽利略的厄运。我对伽利略之所以有一种强烈的认同感，其部分原因是我刚好出生于他死后的300年！



每次宇宙的尺度加倍，
其温度就下降一半。

图8.1



1954年在比基尼珊瑚岛进行的核弹试验在原子弹爆炸中心，人们可以制造大约100亿度的温度这与大爆炸后1秒的宇宙温度相当。

为了解释我和其他人关于量子力学如何影响宇宙的起源和命运的思想，必须首先按照所谓的“热大爆炸模型”来理解被广泛接受的宇宙历史（见图8.2）。这是假定从早到大爆炸时刻起宇宙就可用弗里德曼模型来描述。在此模型中，人们发现当宇宙膨胀时，其中的任何物体或辐射都变得更凉。（当宇宙的尺度大到2倍，它的温度就降低到一半。见图8.1。）由于温度即是粒子的平均能量——或速度的测度，宇宙的变凉对于其中的物质就会有较大的效应。在非常高的温度下，粒子能够运动得如此之快，可以逃脱任何由核力或电磁力将它们吸引在一起的作用。但是可以预料到，随着它们冷却下来，粒子相互吸引并且开始结块。更有甚者，连存在于宇宙中的粒子种类也依赖于温度。在足够高的温度下，粒子的能量是如此之高，只要它们碰撞就会产生很多不同的粒子/反粒子对——并且，虽然其中一些粒子打到反粒子上去时会湮灭，但是它们产生得比湮灭得更快。然而，在更低的温度下，碰撞粒子具有较小的能量，粒子/反粒子对产生得不快——而湮灭则变得比产生更快。

就在大爆炸时，宇宙体积被认为是零，所以是无限热，但是，辐射的温度随着宇宙的膨胀而降低。大爆炸后的1秒钟，温度降低到约为100亿度，这大约是太阳中心温度的1000倍，亦即氢弹爆炸达到的温度。此刻宇宙主要包含光子、电子和中微子（极轻的粒子，它只受弱力和引力的作用）和它们的反粒子，还有一些质子和中子。随着宇宙的继续膨胀，温度继续降低，电子/反电子对在碰撞中的产生率就落到它们的湮

灭率之下。这样，大多数电子和反电子相互湮灭掉了，产生出更多的光子，只剩下很少的电子。然而，中微子和反中微子并没有相互湮灭掉，因为这些粒子和它们自己以及其他粒子的作用非常微弱。这样，直到今天它们应该仍然存在。如果我们能观测到它们，就会为非常热的早期宇宙阶段的图象提供一个很好的检验。可惜现在它们的能量太低了，使得我们不能直接观察到。然而，如果中微子不是零质量，而是像近年的一些实验暗示的，自身具有小的质量，我们则可能间接地探测到它们：正如前面提到的那样，它们可以是“暗物质”的一种形式，具有足够的引力吸引去遏止宇宙的膨胀，并使之重新坍缩。



在这幅拼贴画中，乔治·伽莫夫作为从装有假想的大爆炸太初物质的瓶子跳出的魔鬼。正是伽莫夫和出现在这幅画中的拉夫·阿尔法首次提出宇宙有一非常热的早期。

宇宙简史(热大爆炸模型)

大爆炸

量子效应——未知的物理定律

10^{32} 度

大统一理论(GUT)时期

10^{-43} 秒

10^{27} 度

夸克-反夸克主导时期

10^{-34} 秒

10^{15} 度

质子、中子和介子形成——夸克禁闭和反夸克消失

10^{-10} 秒

10^{10} 度

质子和中子束缚一起形成氢、氦、锂和氘核

1 秒

10^{9} 度

物质和辐射耦合在一起

3 分

3000 度

当电子和核结合在一起,物质和辐射去耦。宇宙对于宇宙背景辐射变成透明

300000 年

20 度

物质团形成类星体、恒星和原始星系。恒星燃烧太初氢和氦并合成更重的核

10 亿年

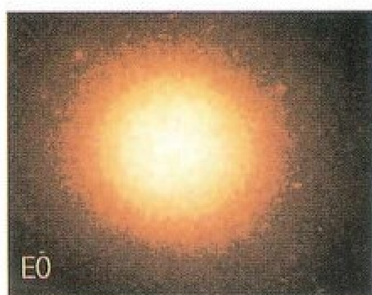
3 度

太阳系围绕着恒星凝结。原子连接形成复杂分子和生命物质

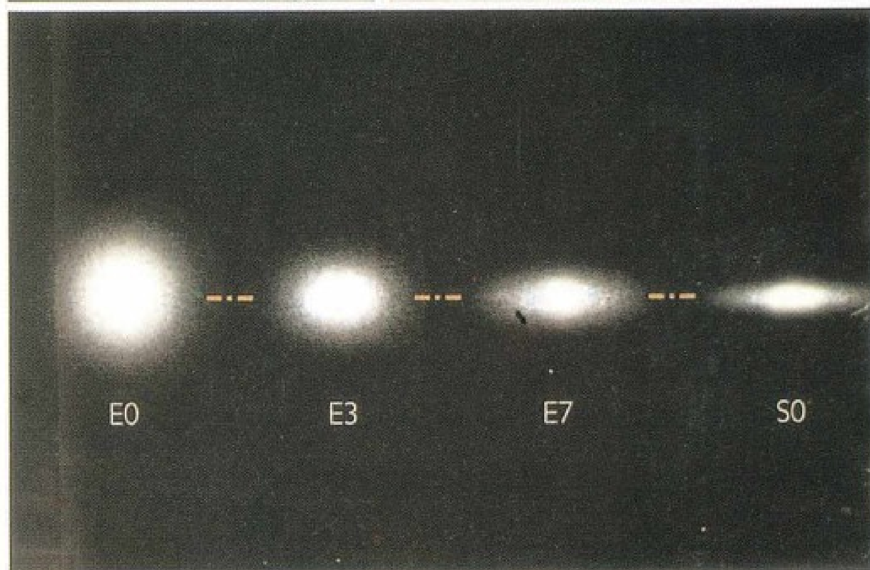
150 亿年

图8.2

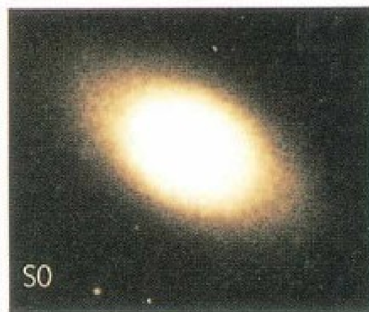
在大爆炸后的大约100秒，温度降到了10亿度，也即最热的恒星内部的温度。在此温度下，质子和中子不再有足够的能量逃脱强核力的吸引，所以开始结合产生氘（重氢）的原子核。氘核包含一个质子和一个中子。然后，氘核和更多的质子、中子相结合形成氦核，它包含两个质子和两个中子，还产生了少量的两种更重的元素锂和铍。可以计算出，在热大爆炸模型中大约1/4的质子和中子变成了氦核，还有少量的重氢和其他元素。余下的中子会衰变成质子，这正是通常氢原子的核。











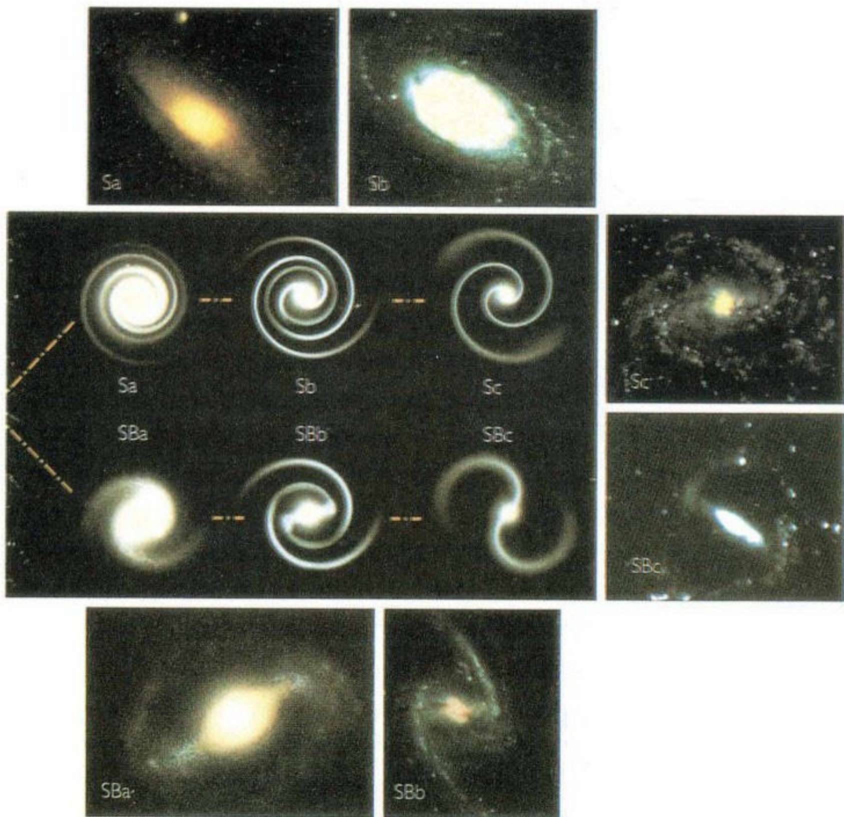
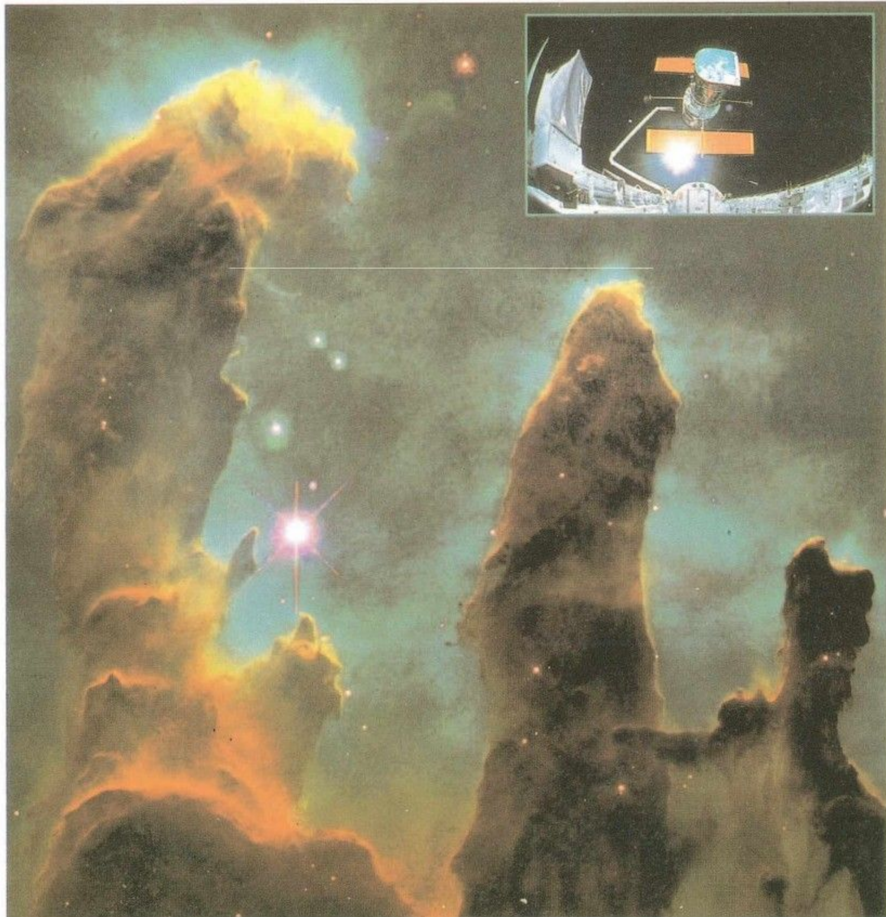


图8.3　1936年埃德温·哈勃和密尔顿·哈默逊提出的星系分类的修正方案：左方为四种无特征的椭圆非旋转系统E0，E3，E7和S0，右上组是螺旋星系Sa, Sb和Sc，而下面是棒旋星系SBa, SBb和SBc在每一组中的三个分类a,b和c表示当星系的臂变得更宽大更开放时中心核的区域变得更小。

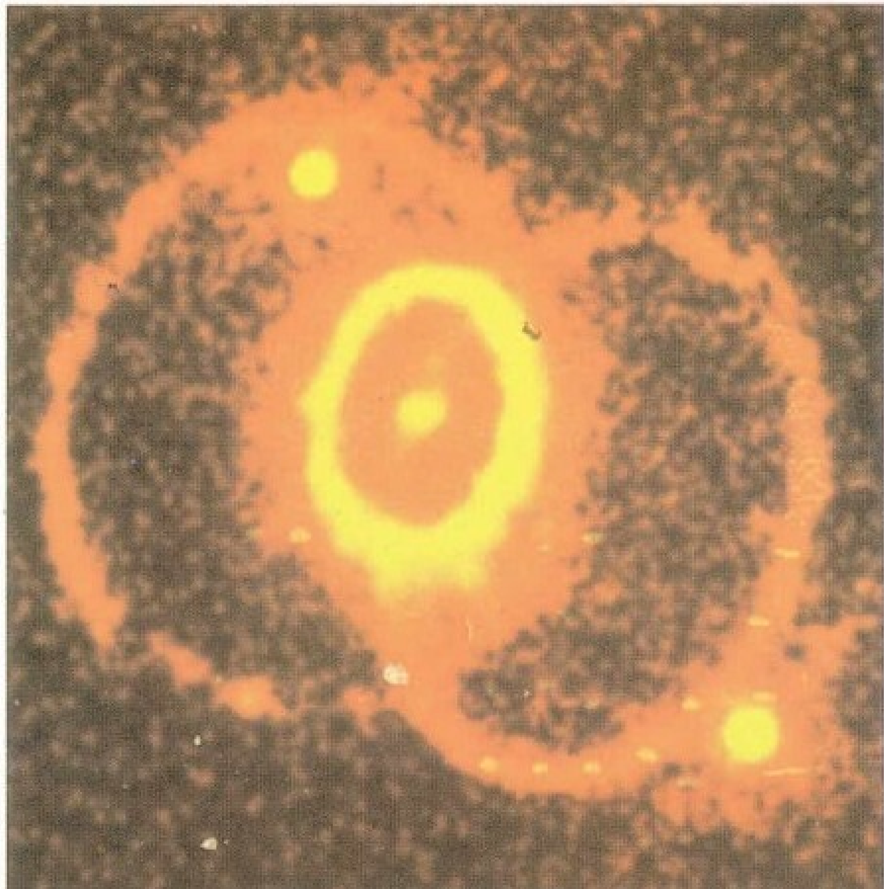
1948年，科学家乔治·伽莫夫和他的学生拉夫·阿尔法在一篇著名的合作的论文中，第一次提出了宇宙的热的早期阶段的图象。伽莫夫颇为幽默——他说服了核物理学家汉斯·贝特将他的名字加到这论文上面，使得列名作者为“阿尔法、贝特、伽莫夫”，正如最前面三个希腊字母：阿尔法、贝他、伽马。这特别适合于一篇关于宇宙开初的论文！他们在此论文中作出了一个惊人的预言：宇宙的热的早期阶段的辐射（以光子的形式）今天还应该在周围存在，但是其温度已被降低到只比绝对零度（-273℃）高几度。这正是彭齐亚斯和威尔逊在1965年发现的辐射。在阿尔法、贝特和伽莫夫写此论文时，对于质子和中子的核反应了解得不多，所以对于早期宇宙不同元素比例所作的预言相当不准确；但是，在用更好的知识重新进行这些计算之后，现在的结果已和我们的观测符合得非常好。况且，在解释宇宙为何应该有这么多氦时，用任何其他方法

都是非常困难的。所以，我们相当确信，至少一直回溯到大爆炸后大约1秒钟为止，这个图象是正确无误的。

大爆炸后的几个钟头之内，氦和其他元素的产生就停止了。之后的100万年左右，宇宙仅仅是继续膨胀，没有发生什么事。最后，一旦温度降低到几千度，电子和核子不再有足够能量去战胜它们之间的电磁吸引力，就开始结合形成原子。宇宙作为整体，继续膨胀变冷，但在一个比平均稍微密集些的区域，膨胀就会由于额外的引力吸引而缓慢下来。在一些区域膨胀最终会停止并开始坍缩。当它们坍缩时，在这些区域外的物体的引力拉力使它们开始很慢地旋转；当坍缩的区域变得更小，它会自转得更快——正如在冰上自转的滑冰者，缩回手臂时会自转得更快。最终，当区域变得足够小，它自转得快到足以平衡引力的吸引，碟状的旋转星系就以这种方式诞生了（图8.3）。另外一些区域刚好没有得到旋转，就形成了叫做椭圆星系的椭球状物体。这些区域之所以停止坍缩，是因为星系的个别部分稳定地围绕着它的中心公转，但星系整体并没有旋转。



天鹰团的尘埃和气体云中正诞生新的恒星。



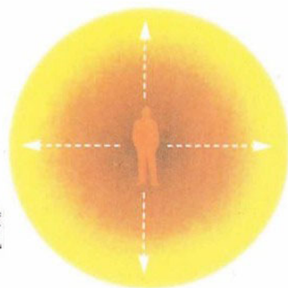
超新星1987年爆发的结果。中心的环是爆发吹散的膨胀的物质，而中央斑点是一个新的中子星。　这两张照片都是哈勃空间望远镜拍摄的从插入小图可以看到它被修理的情景。

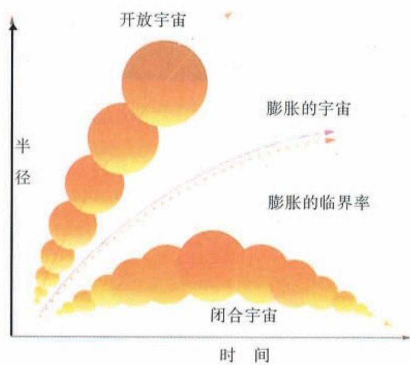
随着时间流逝，星系中的氢和氦气体被分割成更小的星云，它们在自身引力下坍缩。当它们收缩时，其中的原子相互碰撞，气体温度升高，直到最后，热得足以开始热聚变反应。这些反应将更多的氢转变成氦，释放出的热增加了压力，因此使星云不再继续收缩。它们会稳定地在这种状态下，作为像太阳一样的恒星停留一段很长的时间，它们将氢燃烧成氦，并将得到的能量以热和光的形式辐射出来。质量更大的恒星需要变得更热，以平衡它们更强的引力吸引，使得其核聚变反应进行得极快，以至于它们在1亿年这么短的时间里将氢耗光。然后，它们会稍微收缩一点，而随着它们进一步变热，就开始将氦转变成像碳和氧这样更重的元素。但是，这一过程没有释放出太多的能量，所以正如在黑洞那一章描述的，危机就会发生了。人们不完全清楚下一步还会发生什么，但是看来恒星的中心区域很可能坍缩成一个非常致密的状态，譬如

中子星或黑洞。恒星的外部区域有时会在称为超新星的巨大爆发中吹出来，这种爆发使星系中的所有恒星在相形之下显得黯淡无光。恒星接近生命终点时产生的一些重元素就被抛回到星系里的气体中去，为下一代恒星提供一些原料。因为我们的太阳是第二代或第三代恒星，是大约50亿年前由包含有更早超新星碎片的旋转气体云形成的，所以大约包含2%这样的重元素。云里的大部分气体形成了太阳或者喷到外面去，但是少量的重元素集聚在一起，形成了像地球这样的，现在作为行星围绕太阳公转的物体。

地球原先是非常热的，并且没有大气。在时间的长河中它冷却下来，并从岩石中散发气体得到了大气。我们无法在这早先的大气中存活。因为它不包含氧气，反而包含很多对我们有毒的气体，如硫化氢（即是使臭鸡蛋难闻的气体）。然而，存在其他能在这种条件下繁衍的原始的生命形式。人们认为，它们可能是作为原子的偶然结合，形成叫做高分子的大结构的结果，而在海洋中发展，这种结构能够将海洋中的其他原子聚集成类似的结构。它们就这样复制自己并繁殖。在有些情况下复制有些误差。这些误差通常使新的高分子不能复制自己，并最终被消灭。然而，一些误差会产生出新的高分子，在复制它们自己时会变得更好。因此它们具有优势，并且往往取代原先的高分子。进化的过程就是用这种方式开始，并导致越来越复杂的自我复制组织的产生。第一种原始的生命形式消化了包括硫化氢在内的不同物质，而释放出氧气。这就逐渐地将大气改变成今天这样的成分，并且允许诸如鱼、爬行动物、哺乳动物以及最后人类等生命的更高形式的发展。


宇宙从非常热开始


微波背景温度
在所有方向几
乎完全相同


开放宇宙
膨胀的宇宙
半
径
膨胀的临界率
闭合宇宙
时　间
宇宙处于继续膨胀和重新坍缩

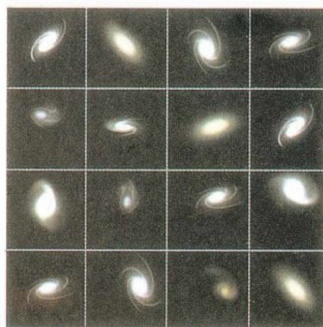
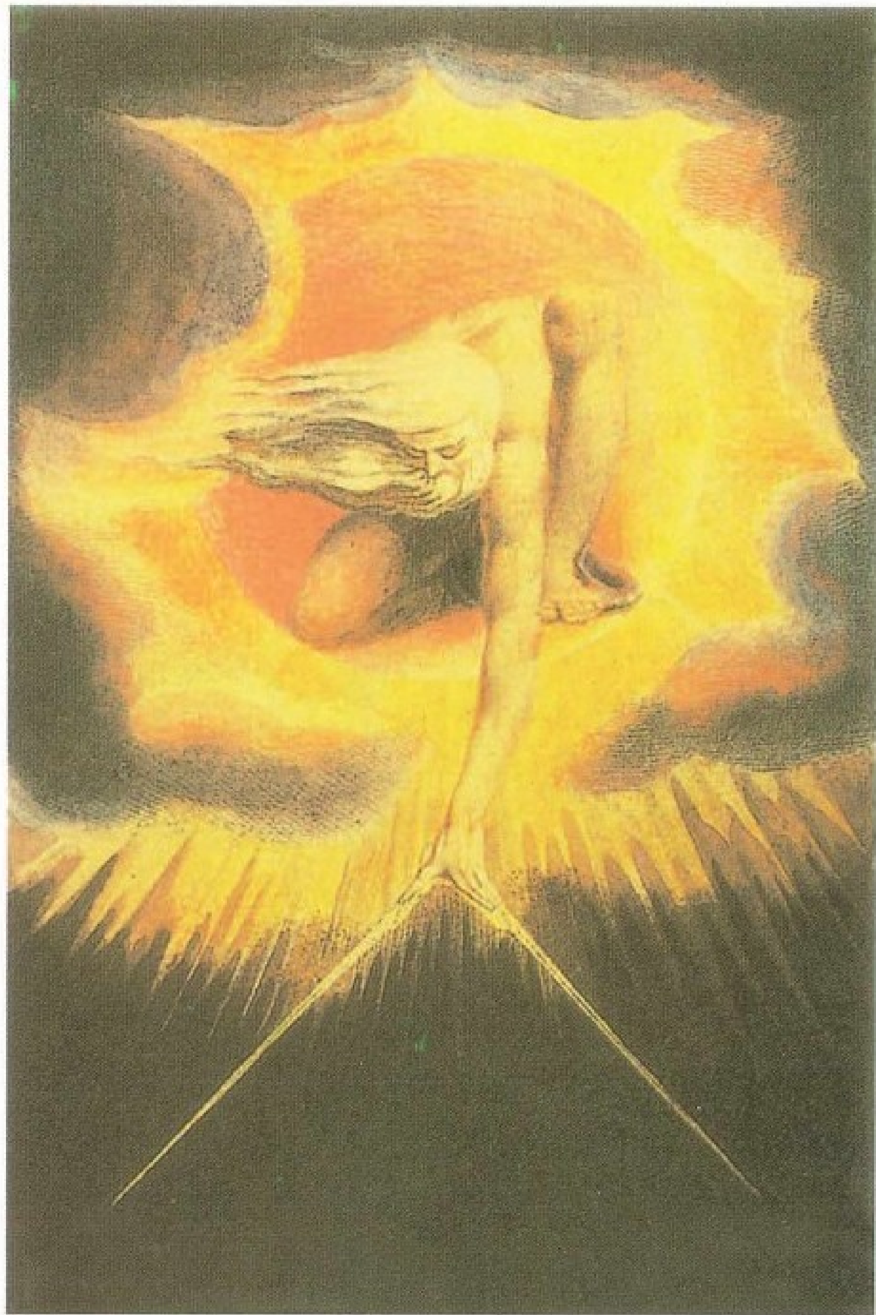

宇宙密度的微小起伏导致星系和恒星的形成

图8.4



“造物主”，威廉·布拉克绘制（1757～1827）。

宇宙从非常热的状态开始并随膨胀而冷却的景象，和我们今天所有的观测证据相一致。尽管如此，它还留下许多未被回答的重要问题（图8.4）：

（1）为何早期宇宙如此之热？

（2）为何宇宙在大尺度上如此均匀？为何它在空间的所有点上和所有方向上看起来相同？尤其是当我们朝不同方向看时，为何微波辐射背景的温度几乎完全相同？这有点像问许多学生一个考试题。如果所有人都给出完全相同的回答，你就会相当肯定，他们相互之间交流过。在上述的模型中，从大爆炸开始光还没有来得及从一个遥远的区域到达另一个区域，即使这两个区域在宇宙的早期靠得很近。按照相对论，如果连光都不能从一个区域到达另一个区域，则没有任何其他的信息能做到。所以，除非因为某种不能解释的原因，导致早期宇宙中不同的区域刚好从同样的温度开始，否则没有一种方法能使它们达到相互一样的温度。

（3）为何宇宙以这么接近于区分坍缩和永远膨胀模型的临界膨胀率开始，这样即使在100亿年以后的现在，它仍然几乎以临界的速率膨胀？如果在大爆炸后的1秒钟那一时刻其膨胀率哪怕小十亿亿分之一，那么在它达到今天这么大的尺度之前宇宙早已坍缩。

（4）尽管宇宙在大尺度上是如此的一致和均匀，它却包含有局部的无规性，诸如恒星和星系。人们认为，这些是从早期宇宙中不同区域之间密度的细小差别发展而来的。这些密度起伏的起源是什么？

广义相对论本身不能解释这些特征或回答这些问题，因为它预言，宇宙是从在大爆炸奇点处的无限密度起始的。广义相对论和所有其他物理定律在奇点处都失效了：人们不能预言从奇点会出来什么。正如以前解释的，这表明我们可以从这理论中割除去大爆炸奇点和任何先于它的事件，因为它们对我们没有任何观测效应。时空会有一个边界——大爆炸处的开端。

科学似乎揭示了一族定律，在不确定性原理设下的极限内，如果我们知道宇宙在任一时刻的状态，这些定律就会告诉我们，它如何随时间发展。这些定律也许原先是由上帝颁布的，但是看来从那以后他就让宇宙自身按照这些定律去演化，而现在不对它干涉。但是，他是怎么选择宇宙的初始状态和结构的呢？什么是在时间起始处的“边界条件”？

一种可能的回答是，上帝选择宇宙的这种初始结构是因为某些我们无望理解的原因。这肯定是在一个全能造物主的力量之内。但是如果他

使宇宙以这种不能理解的方式开始，他为何又选择让它按照我们可理解的定律去演化？整部科学史正是对事件不是以任意方式发生，而是反映了一定内在秩序的逐步的意识。这秩序可以是，也可以不是由神灵启示。只有假定这种秩序不但应用于定律，而且应用于时空边界处的条件时才是自然的，这种条件指明宇宙的初始态。可以有大量具有不同初始条件的宇宙模型，它们都服从定律。应该存在某种原则去抽取一个初始状态，也就是一个模型，去代表我们的宇宙。

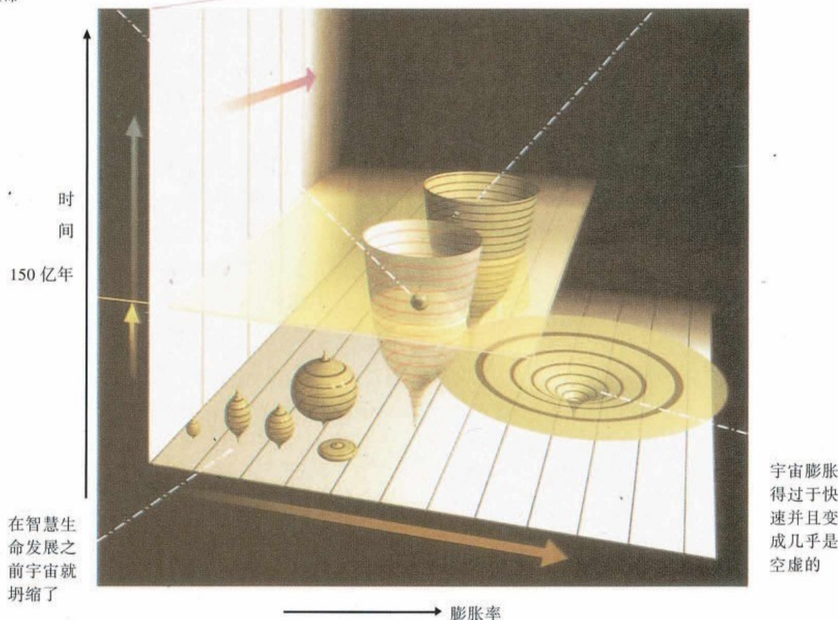


图8.5　强人存原理假设，存在许多具有不同初始膨胀率和其他基本物理性质的不同的宇宙。只有一些适合于生命。

所谓的混沌边界条件即是这样一种可能性。这些条件含蓄地假定，要么宇宙是空间无限的，要么存在无限多宇宙，在混沌边界条件下，在刚刚大爆炸之后，寻求任何空间区域在任意给定的结构的概率，在某种意义上，和它在任何其他结构的概率是一样的：宇宙初始态的选择纯粹是随机的。这意味着，早期宇宙可能是非常混沌和无序的。因为与光滑和有序的宇宙相比，存在着多得多的混沌和无序的宇宙。（如果每一结构都是等几率的，因为混沌无序态多得这么多，宇宙多半会从这种态起始）。很难理解，从这样混沌的初始条件，如何导致今天我们这个在大

尺度上如此光滑和规则的宇宙。人们还预料，在这样的模型中，密度起伏导致比伽马射线背景观测设定的上限多得多的太初黑洞的形成。

如果宇宙确实是空间无限的，或者如果存在无限多宇宙，就会存在某些从光滑和一致的形态开始演化的大的区域。这有点像著名的一大群猴子锤击打字机的故事——它们所写的大部分都是废话。但是纯粹由于偶然，它们可能碰巧打出莎士比亚的一首十四行诗。类似地，在宇宙的情形下，是否我们可能刚好生活在一个光滑和均匀的区域里呢？初看起来，这是非常不可能的，因为这样光滑的区域比混沌的无序的区域稀罕得多。然而，假定只有在光滑的区域里星系、恒星才能形成，才能有合适的条件，让像我们这样复杂的，能自然复制的机体得以发展，这种机体能够质疑宇宙为什么如此光滑的问题。这就是应用称为人存原理的一个例子。人存原理可以解释为："我们看到的宇宙之所以如此，乃是因为我们的存在。"

人存原理有弱的和强的意义下的两种版本。弱人存原理是讲，在一个大的或具有无限空间和/或时间的宇宙里，只有在某些时空有限的区域里，才存在智慧生命发展的必要条件。因此，在这些区域中，如果智慧生物观察到他们在宇宙的位置满足他们存在必要的条件，他们就不应感到惊讶。这有点像生活在富裕街坊的富人看不到任何贫穷。

应用弱人存原理的一个例子是"解释"为何大爆炸发生于大约100亿年之前——智慧生物大约需要那么长时间演化，正如前面解释的，一个早代的恒星必须首先形成。这些恒星将原先的一些氢和氦转化成像碳和氧这样的元素，由这些元素构成我们然后恒星作为超新星而爆发，其裂片形成其他恒星和行星，其中就包括我们的太阳系，太阳系年龄大约是50亿年地球存在的头10亿或20亿年，对于任何复杂东西的发展都嫌太热，余下的30亿年左右才用于生物进化的漫长过程，从最简单的生命，直到能够测量回溯到大爆炸的时间的生命，就在此期间形成。

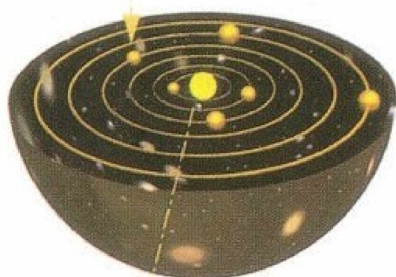
很少有人会对弱人存原理的有效性提出异议。然而，有的人走得更远并提出强人存原理（图8.5）。按照这个理论，要么存在许多不同的宇宙，要么存在一个单独宇宙的许多不同的区域，每一个都有自己初始的结构，或许还有自己的一族科学定律这些宇宙中的大多数，不具备复杂机体发展的合适条件；只有在少数像我们的宇宙中，智慧生命才得以发展并能质疑："为何宇宙是我们看到的这种样子？"答案很简单：如果它不是这个样子，我们就不会在这里！

我们现在知道，科学定律包含许多基本的数，如电子电荷的大小以及质子和电子的质量比。至少现在，我们不能从理论上预言这些数值——我们必须由观测找到它们。也许有一天，我们会发现一个将它们所有都预言出来的完备的统一理论，但是还有可能它们之中的一些或全部，在不同的宇宙或在一个单一宇宙之中是变化的。值得注意的事实是，这些数值看来是被非常细微地调整到让生命得以发展。例如，如果电子的电荷只要稍微有点不同，则要么恒星不能够燃烧氢和氦，要么它们没有爆炸过。当然，也许存在其他形式的、甚至还没被科学幻想作家梦想过的智慧生命。它并不需要像太阳这样恒星的光，或在恒星中制造出并在它爆炸时被抛到空间去的更重的化学元素。尽管如此，看来很清楚，允许任何智慧生命形式的发展的数值范围是比较小的对于大部分数值的集合，宇宙也会产生，虽然它们可以是非常美的，可惜不包含任何一个能为如此美丽而倾倒的人。人们既可以认为这是在创生和科学定律选取中的神意的证据，也可以认为是对强人存原理的支持。

托勒密的地心宇宙学，地球处于宇宙的中心



哥白尼的日心宇宙学，地球在太阳系里，其他恒星在外空间运行



星系宇宙学，地球绕着银河系一个螺旋臂的外端的一个中等恒星公转



我们现在的图象是，银河系只是宇宙在我们特定的区域内的万亿个可观察到的星系中的一个



人们可以提出一系列理由，来反对用强人存原理解释观察到的宇宙

状态。首先，在何种意义上，可以说所有这些不同的宇宙存在？如果它们确实相互隔开，在其他宇宙中发生的事件在我们自己的宇宙中就没有可观测的后果。所以，我们应该用经济原理，将它们从理论中割除掉。另一方面，它们若仅仅是一个单一宇宙的不同区域，则在每个区域里的科学定律必须是一样的，否则人们就不能从一个区域连续地运动到另一区域。在这种情况下，不同区域之间的仅有的不同是它们的初始结构：这样，强人存原理即归结为弱人存原理。

对强人存原理的第二个异议是，它和整个科学史的潮流背道而驰。我们现代的图象是从托勒密和他的支持者的地心宇宙论出发，通过哥白尼和伽利略日心宇宙论发展而来的、在此图象中，地球是一个中等大小的行星，它围绕着一个寻常的螺旋星系外圈的普通恒星作公转，而这星系本身只是可观察到的宇宙中大约万亿个星系之一（图8.6）。然而强人存原理却宣布，这整个庞大的构造仅仅是因我们的缘故而存在，这是非常令人难以置信的。我们太阳系肯定是我们存在的前提，人们可以将之推广于我们的整个星系，作为让产生重元素的早代恒星存在的前提。但是，丝毫看不出存在任何其他星系的必要，宇宙在大尺度上也不必在每一方向上必须如此一致和类似。

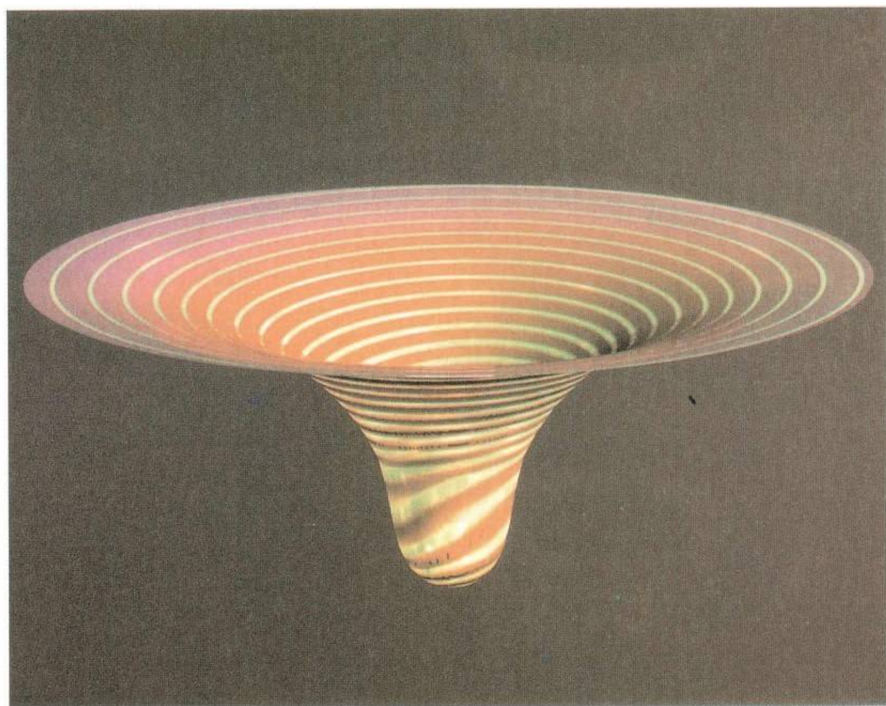


图8.7　在热大爆炸模型中，膨胀率总是随时间减小。但是，在暴胀模型中膨胀率在早期阶段快

速增大。

如果人们能够表明，宇宙的相当多不同的初始结构会演化产生像我们今天看到的宇宙，至少在弱的形式上，人们会对人存原理感到更满意。如果果真如此，则一个从某些随机的初始条件发展而来的宇宙，应当包含许多光滑均匀的区域，而且这些区域适合智慧生命演化。另一方面，如果必须极端仔细地选择宇宙的初始条件，才能导致在我们周围所看到的一切，宇宙就不太可能包含任何会出现生命的区域。在上述的热大爆炸模型中，热来不及从一个区域流到另一区域这意味着宇宙的初始态在每一处必须刚好有同样的温度，才能说明我们在每一方向上看到的微波背景辐射都有同样温度。其初始的膨胀率也要非常精确地选择，才能使现在的膨胀率仍然这么接近于需要用以避免坍缩的临界速率。这表明，如果热大爆炸模型直到时间的开端都是正确的，则确实必须非常仔细地选择宇宙的初始态。所以，除非作为上帝有意创造像我们这样生命的行为，否则很难解释，为何宇宙只用这种方式起始。

为了试图寻找一个能从许多不同的初始结构演化到像现在这样的宇宙的东西，麻省理工学院的科学家阿伦·固斯提出，早期宇宙可能经历过一个非常快速膨胀的时期。这种膨胀叫做“暴胀”，意指宇宙在一段时间里，不像现在这样以减少的，而是以增加的速率膨胀（图8.7）。按照固斯理论，在远远小于1秒的时间里，宇宙的半径增大了100万亿亿亿（1后面跟30个0）倍。

固斯提出，宇宙是以一种非常热而且相当混沌的状态从大爆炸起始的。这些高温表明宇宙中的粒子运动得非常快并具有高能量。正如早先我们讨论过的，人们预料在这么高的温度下，强和弱核力及电磁力都被统一成一个单独的力。随着宇宙膨胀，它会变冷，而粒子能量下降。最后出现了所谓的相变，并且力之间的对称性被破坏了：强力变得和弱力以及电磁力不同相变的一个普通的例子是，当水降温时会冻结成冰、液态水是对称的，它在任何一点和任何方向上都是相同的。然而，当冰晶体形成时，它们有确定的位置，并在某一方向上整齐排列。这就破坏了水的对称。

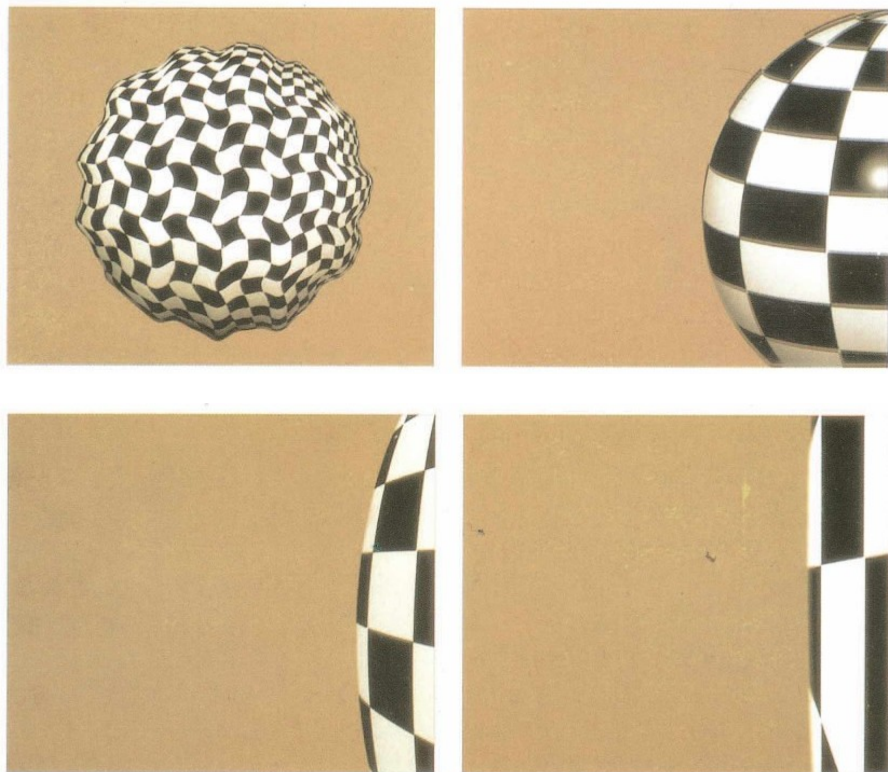


图8.8　宇宙在最初时的快速膨胀将宇宙展平，而且使膨胀率几乎成为临界值。

在水的情形，只要你足够小心，就能使之“过冷”：也就是可以将温度降低到冰点（0℃）以下而不结冰。固斯认为，宇宙的行为也很相似：宇宙温度可以降低到临界值以下，而各种力之间的对称没有受到破坏。如果发生这种情形，宇宙就处于一个不稳定状态，其能量比对称破缺时更大。可以指出，这特殊的额外能量呈现出反引力的效应：其作用如同一个宇宙常数。宇宙常数是当爱因斯坦在试图建立一个稳定的宇宙模型时，引进广义相对论之中去的。由于宇宙已经像大爆炸模型那样膨胀，所以这宇宙常数的排斥效应使得宇宙以不断增加的速度膨胀，即使在一些物质粒子比平均数更多的区域，这一有效宇宙常数的排斥作用也超过了物质的引力吸引作用。这样，这些区域也以加速暴胀的形式膨胀。当它们膨胀时，物质粒子就越分越开，留下了一个几乎不包含任何粒子，并仍然处于过冷状态的膨胀的宇宙。这种膨胀抹平了宇宙中的任何不规则性，正如当你吹胀气球时，它上面的皱纹就被抹平了（图8.8）。这样，从许多不同的非均匀的初始状态可以演化出宇宙现在光滑均匀的状态。

在这样一个其膨胀由宇宙常数加速，而不因物质的引力吸引使之减慢的宇宙中，早期宇宙中的光线就有足够的时间从一个区域旅行到另一个区域。这就解答了早先提出的，为何在早期宇宙中的不同区域具有同样性质的问题。不但如此，宇宙的膨胀率也自动变得非常接近由宇宙的能量密度决定的临界值。这就能够解释，不需假设宇宙初始膨胀率曾被非常仔细地选择过，为何现在的膨胀率仍然这么接近临界值。

暴胀的思想还能解释为何在宇宙中存在这么多物质。在我们能观察到的宇宙中大约有1亿亿亿亿亿亿亿亿亿亿（1后面跟80个0）个粒子。它们从何而来？答案是，在量子理论中，粒子可以以粒子/反粒子对的形式由能量中创生出来。但这只不过引起能量从何而来的问题。答案是，宇宙的总能量准确为零。宇宙中的物质是由正能量产生的。然而，物质本身由于引力总是吸引的。两块相互靠近的物质比两块分得很开的物质具有较少的能量，因为你必须消耗能量去克服把它们拉在一起的引力才能将其分开。这样，在一定意义上，引力场具有负能量。在空间上大体一致的宇宙的情形中，人们可以证明，这个负的引力能刚好抵消了物质所代表的正能量。这样，宇宙的总能量为零。

零的两倍仍为零。这样，宇宙可以同时将其正的物质能和负的引力能加倍，而不违反能量守恒。在宇宙正常膨胀时，这并没有发生。这时当宇宙变大时，物质能量密度下降。然而，这种情形确实发生于暴胀时期。因为当宇宙膨胀时，过冷态的能量密度保持不变：当宇宙体积加倍时，正物质能和负引力能都加倍，这样总能量保持为零。在暴胀相，宇宙的尺度增大了一个非常大的倍数。这样，可用以制造粒子的总能量变得非常大。正如固斯说过的：“都说没有免费午餐这回事，但是宇宙却是最彻底的免费午餐。”

今天宇宙不是以暴胀的方式膨胀。这样，必须有一种机制，它可以消去这一非常大的有效宇宙常数，从而使膨胀率从加速的状态改变为如同今天这样由引力减慢的状态。人们可以预料，在宇宙暴胀时各种力之间的对称最终会破缺，正如过冷的水最终会凝固一样。这样，未破缺的对称态的额外能量就会释放，并将宇宙重新加热到刚好低于使各种力对称的临界温度。以后，宇宙就以标准的大爆炸模式继续膨胀并变冷、但是，现在我们可以解释，为何宇宙刚好以临界速率膨胀，并且为何不同的区域具有相同的温度。

若干年前暴胀宇宙场景的状况
（剑桥 1982 年）



安德雷·林德的卡通描绘20世纪80年代早期的暴胀模型的状态。

在固斯的原先设想中，有点像在非常冷的水中出现冰晶体，相变是突然发生的。其想法是，正如同沸腾的水围绕着蒸汽泡，新的对称破缺相的“泡泡”在原有的对称相中形成。设想泡泡膨胀并相互碰撞，直到整个宇宙处于新相。麻烦在于，正如同我和其他几个人指出的，宇宙膨胀得如此之快，即使泡泡以光速胀大，它们也要相互分离，并因此不能合并在一起。结果宇宙变成一种非常不均匀的状态，有些区域仍具有各种

力之间的对称。这样的模型跟我们观察到的宇宙不吻合。

1981年10月，我去莫斯科参加量子引力的会议。会后，我在斯特堡天文研究所做了一个有关暴胀模型和它的问题的讲演。在此之前，我请其他人替我宣读讲稿，因为大多数人听不懂我的声音。但是这一次我来不及准备讲稿，所以我自己讲，让我的一名研究生逐字逐句地重复我的话。演讲进行得很顺利，并且使我有多得多的时间和听众交谈。听众席中有一位年轻的苏联人，莫斯科列别捷夫研究所的安德雷·林德。他说，如果泡泡是如此之大，使得我们的宇宙区域被整个地包含在一个单独的泡泡之中，则可以避免泡泡不能合并在一起的困难。为了使这个行得通，从对称相向对称破缺相的改变必须在泡泡中发生得非常缓慢，但是按照大统一理论这是完全可能的。林德的缓慢对称破缺思想非常好，但是过后我意识到，他的泡泡在那一时刻必须比宇宙的尺度还要大！我指出，那时对称不仅仅在泡泡里，而且在所有的地方同时被破坏。这会导致一个正如我们观察到的一致的宇宙。我被这个思想弄得非常激动，并和我的一个学生因·莫斯讨论。然而，当我后来收到一个科学杂志社寄来的林德的论文，征求是否可以发表时，作为他的朋友，我感到相当难为情。我答复说，这里有一个关于泡泡比宇宙还大的瑕疵，但是里面关于缓慢对称破缺的基本思想是非常好的。我建议将此论文照原样发表。因为林德要花几个月时间去改正它，并且他寄到西方的任何东西都要通过苏联的审查，这种对于科学论文的审查既无技巧可言又很缓慢。我和因·莫斯便越俎代庖，为同一杂志写了一篇短文。我们在该文中指出这泡泡的问题，并提出如何将其解决。

我从莫斯科返回的第二天，即去费城接受富兰克林研究所的奖章。我的秘书朱迪·费拉施展其不俗的魅力说服了英国航空公司给她自己和我免费提供协和式飞机的广告旅行坐席。然而，在去机场的路上被大雨耽搁，我没赶上航班。尽管如此，我最终还是到了费城并得到奖章。之后，我应邀在费城的爵索尔大学作了关于暴胀宇宙的演讲。我所作的演讲，正和在莫斯科的一样，是关于暴胀宇宙的问题。

几个月之后，宾州大学的保罗·斯特恩哈特和安德鲁斯·阿伯勒希特独立地提出和林德非常相似的思想。现在他们和林德分享以缓慢对称破缺的思想为基础的所谓“新暴胀模型”的荣誉。（旧的暴胀模型是指固斯关于形成泡泡后快速对称破缺的原始设想。）

新暴胀模型是一个好的尝试，它能解释宇宙为何是这种样子。然而

我和其他几个人指出，至少在它原先的形式，它预言的微波背景辐射的温度变化要比观察到的大得多。后来的工作还对极早期宇宙中是否存在过这类需要的相变提出怀疑。我个人的意见是，现在新暴胀模型作为一个科学理论气数已尽。虽然还有很多人似乎不承认它的死亡，还继续写文章，好像那理论还有生命力。1983年，林德提出了一个更好的所谓混沌暴胀模型。这里没有相变和过冷，而代之以存在一个自旋为0的场，由于它的量子涨落，在早期宇宙的某些区域有大的场值。在那些区域中，场的能量起到宇宙常数的作用，它具有排斥的引力效应，而使这些区域以暴胀的形式膨胀。随着它们膨胀，它们中的场的能量慢慢地减小，直到暴胀改变到犹如热大爆炸模型中的膨胀时为止。这些区域之一就成为可观察的宇宙让我们看到。这个模型具有早先暴胀模型的所有优点，但是它并不取决于使人生疑的相变，此外，它还能给出微波背景辐射温度起伏的合理幅度，这与观测相符合。

暴胀模型的这个研究指出：宇宙现在的状态可以从相当大量的不同初始结构引起。这很重要，因为它表明不必非常细心地选取我们居住的那部分宇宙区域的初始状态。所以，如果愿意的话，我们可以利用弱人存原理解释宇宙为何现在如此这般。然而，绝不是任何一种初始结构都会产生像我们观察到的宇宙。这一点很容易做到。考虑现在宇宙处于一个非常不同的态，例如一个非常成团的非常无规则的态。人们可以利用科学定律，在时间上将其演化回去，以确定宇宙在更早时刻的结构。按照经典广义相对论的奇点定理，仍然存在一个大爆炸奇点。如果你在时间前进方向上按照科学定律演化这样的宇宙，你就会得到你从其开始的那个成团的无规则的态。这样，必定存在不会产生像我们今天观察到的宇宙的初始结构。所以，就连暴胀模型也没有告诉我们，为何初始结构不是那种态，从它演化成和我们观测到的非常不同的宇宙。我们是否应该再从人存原理得到解释呢？难道所有这一切仅仅是因为好运气？看来，这只是无望的遁词，是对我们理解宇宙根本秩序的所有希望的否定。

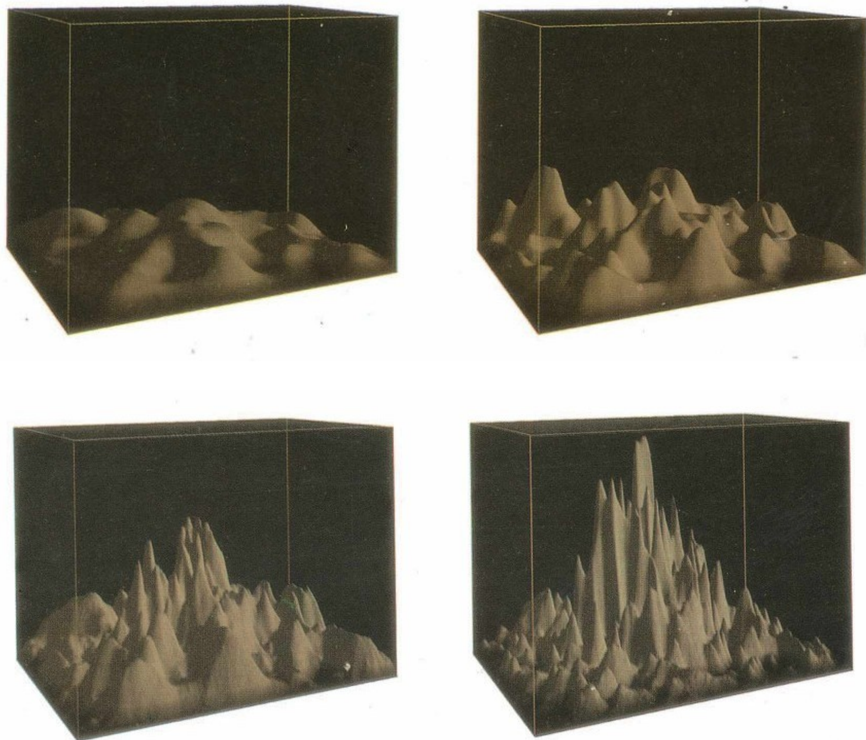


图8.9　安德雷·林德提出的一种暴胀模型是，一个场的量子涨落的发生、引起宇宙的一部分区域像尖峰一样快速膨胀，而其他区域，譬如我们的区域，可用盆地来代表，不再暴胀。

为了预言宇宙应该如何起始，人们需要在时间开端处成立的定律。罗杰·彭罗斯和我证明的奇点定理指出，如果广义相对论的经典理论是正确的，则时间的开端是具有无限密度和无限时空曲率的一点，在这样的点上所有已知的科学定律都崩溃。人们可以设想存在在奇点处成立的新定律，但是在如此不守规矩之处，甚至连表述这样的定律都是非常困难的，而且从观察中我们没有得到关于这些定律应是什么样子的任何指示。然而，奇点定理真正揭示的是，引力场变得如此之强，使量子引力效应变得十分重要：经典理论已经不能很好地描述宇宙。这样，人们必须用量子引力论去讨论宇宙的极早期阶段。正如我们将会看到的，在量子力学中，通常的科学定律有可能在任何地方都有效，包括时间开端这一点在内：不必针对奇点提出新的定律，因为在量子理论中不必存在任何奇点。

我们仍然没有一套完备而协调的理论将量子力学和引力结合在一起。然而，我们相当清楚这样一套统一理论所应该具备的某些特征。其中一个就是它必须和费恩曼提出的按照对历史求和的量子力学表述相合

并。在这种方法里，一个粒子不像在经典理论中那样，不仅只有一个单独的历史。相反，它被认为通过时空里的任何可能的路径，这些历史中的每一个都有一对相关的数，一个代表波的幅度，另一个代表它在循环中的位置（相位）。粒子通过某一特定点的概率是将通过此点的所有可能历史的波叠加求得。然而，当人们实际去进行这些求和时，就遭遇到了严重的技术问题。回避这个问题的仅有的独特方法是：你必须不是对发生在你我经验的“实的”时间内的，而是对发生在所谓“虚的”时间内的粒子历史的波进行求和。虚时间可能听起来像是科学幻想，但事实上，它是定义得很好的数学概念。如果你取任何平常的（或“实的”）数和它自己相乘，结果是一个正数。（例如2乘2是4，但-2乘-2也是这么多。）然而，存在一种特别的数（叫虚数），当它们自乘时得到负数（叫做i的数自乘时得-1，2i自乘得-4，等等）。

人们可以用下面的办法来图解实数和虚数（图8.10）：实数可以用一根从左至右的线来代表，中间是零点，像-1，-2等负数在左边，而像1，2等正数在右边。而虚数由书页上一根上下的线来代表，i，2i等在中点以上，而-i，-2i等在中点以下。这样，在某种意义上，虚数和通常的实数夹一直角。

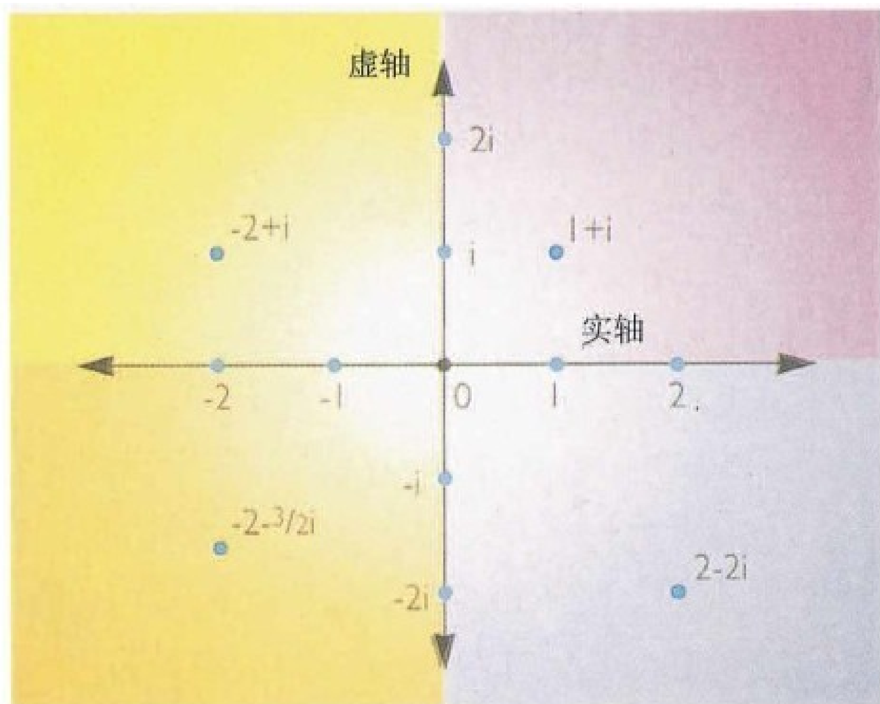


图8.10　实数用一条从左至右的水平线来代表。虚数用一条垂直线来代表。

人们必须利用虚时间，以避免在进行费恩曼对历史求和的技术上的困难。也就是说，为了计算的目的，人们必须用虚数而不是用实数来测量时间。这对时空有一有趣的效应：时间和空间的区别完全消失。事件具有虚值时间坐标的时空称为欧几里得型的，它是采用建立了二维面几何的希腊人欧几里得的名字命名的。我们现在称之为欧几里得时空的东西，除了是四维而不是二维以外，其余的和它都非常相似。在欧几里得时空中，时间方向和在空间中的方向没有不同之处。另一方面，在通常用实的时间坐标来标记事件的实的时空里，人们很容易区别这两种方向一位于光锥中的任何点是时间方向，位于光锥之外的为空间方向。无论如何，就日常的量子力学而言，我们利用虚的时间和欧几里得时空，可以认为仅仅是一个计算有关实时空的答案的数学手段（或技巧）。

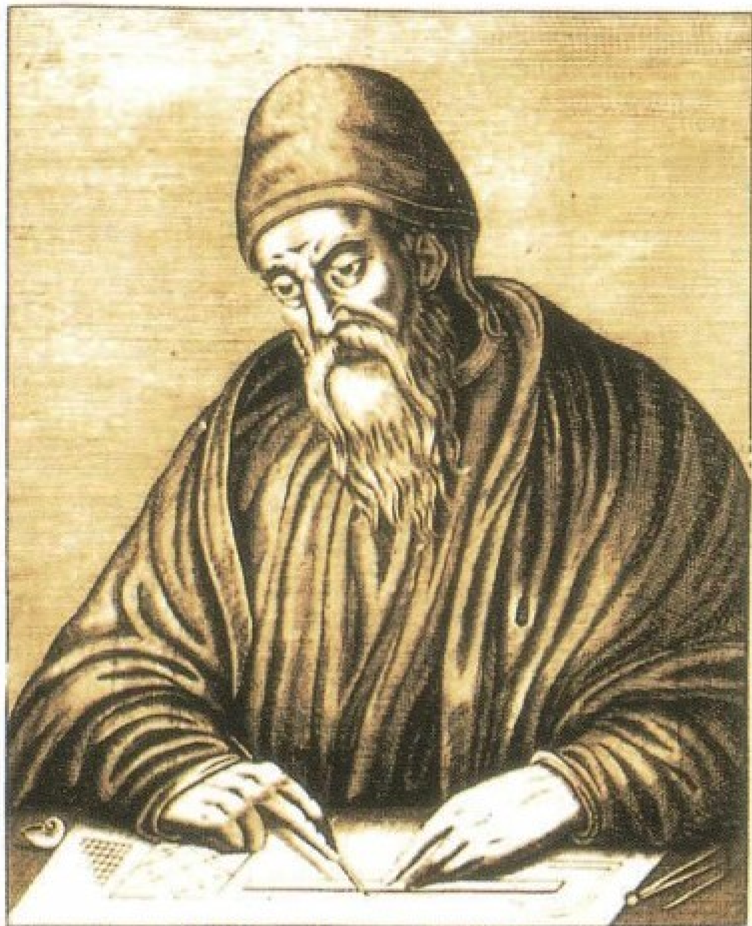
我们相信，作为任何终极理论的一部分而不可或缺的第二个特征是爱因斯坦的思想，即引力场由弯曲的时空来代表：粒子在弯曲空间中试图沿着最接近于直线的某种路径走。但是因为时空不是平坦的，它们的路径看起来似乎被引力场折弯了。当我们利用费恩曼的历史求和方法去处理爱因斯坦的引力观点时，和粒子的历史相类似的东西则是代表整个宇宙历史的完整的弯曲时空。为了避免实际进行历史求和的技术困难，这些弯曲的时空必须采用欧几里得型的。也就是，时间是虚的并和空间的方向不可区分。为了计算找到具有一定性质的，例如在每一点和每一方向上看起来都一样的实时空的概率，人们把和所有具有这性质的历史相关联的波叠加起来即可。

在广义相对论的经典理论中，可能有许多不同的弯曲时空，每一个对应于宇宙不同的初始态。如果我们知道我们宇宙的初始态，我们就会知道它的整个历史。类似地，在量子引力论中，宇宙可能存在许多不同的量子态。同样地，如果我们知道在历史求和中的欧几里得弯曲时空在早先时刻的行为，我们就会知道宇宙的量子态。

在以实的时空为基础的经典引力论中，宇宙可能的行为只有两种方式：要么它已存在了无限长时间，要么它在有限的过去的某一时刻的奇点上有一个开端。而在量子引力论中，产生了第三种可能性。因为人们采用欧几里得时空，在这里时间方向和空间方向具有相同的地位，所以时空有可能在范围上是有限的，却没有形成边界或边缘的奇点。时空就像是地球的表面，只不过多了两维。地球的表面在范围上是有限的，但它没有边界或边缘：如果你朝着落日的方向驾船，你不会掉到边缘外面

或陷入奇点中去。（因为我曾经环球旅行过，所以知道！）

如果欧几里得时空延伸到无限的虚时间，或者在一个虚时间奇点处开始，我们就会遇到和经典理论中指定宇宙初态同样的问题：即上帝可以知道宇宙如何开始，但是我们提不出任何特别原因，认为它应以这种而不是那种方式开始。另一方面，量子引力论开辟了另一种新的可能性，在这里时空没有边界，所以没有必要指定边界上的行为。这里不存在在该处科学定律崩溃的奇点，也就是不存在在该处必须祈求上帝或某些新的定律给时空设定边界条件的时空边缘。人们可以说："宇宙的边界条件是它没有边界。"宇宙便是完全自足的，而不受任何外在于它的东西影响。它既不被创生，也不被消灭。它就是存在。



See the Bold-Shaddow of Vrania's Glory,
Immortall in his Race, no lesse in Story:
An Artist without Error, from whose Lyne,
Both Earth and Heav'ns, in sweet Proportions twine:
Behold Great EUCLID! But, behold Him well!
For 'tis in Him DIVINITY doth dwell.

G. Wharton.

欧几里得，公元前295年。

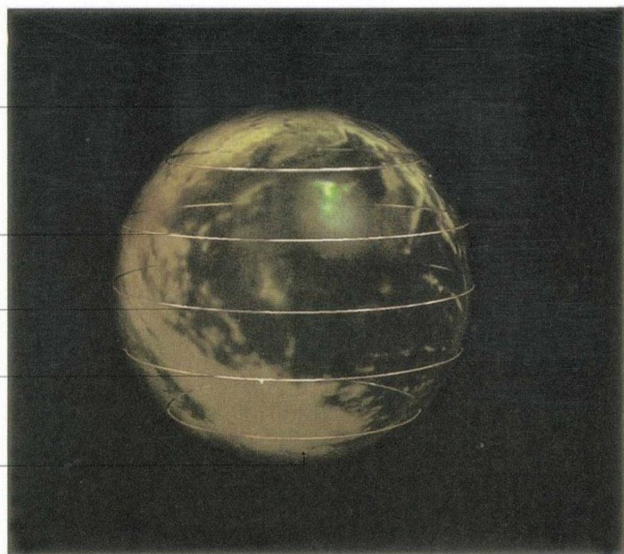
我正是在早先提到的那次梵蒂冈会议上首次提出，时间和空间可能会共同形成一个在尺度上有限却没有任何边界或边缘的面。然而我的论文数学气息太浓，所以文章中包含的上帝在创生宇宙的作用的含义在当时没被普遍意识到（对我也是如此）。在梵蒂冈会议期间，我不知道如何用“无边界”思想去预言宇宙。然而，次年夏天，我在加州大学的圣他巴巴拉分校度过。在那里，我的一位朋友兼合作者詹姆·哈特尔和我共同

得出了如果时空没有边界时宇宙应满足的条件。回到剑桥后，我和我的两个研究生朱丽安·拉却尔和约纳逊·哈里威尔继续从事这项工作。

我要着重说明，时空是有限而“无界”的思想仅仅是一个设想，它不能从其他原理导出。正如任何其他科学理论，它原先可由美学或形而上学的原因提出，但是它给出的预言是否与观测相一致是对它的真正检验。不过，在量子引力的情况下，由于以下两个原因这很难确定。首先，正如将要在第十一章解释的，虽然我们对能将广义相对论和量子力学合并在一起的理论应具有的方式，已经知道得相当多，但是还不能准确地知道哪种理论能成功地做到这一点。其次，任何详尽描述整个宇宙的模型在数学上都过于复杂，使我们不能通过计算作出准确的预言。所以，人们不得不做简化的假设和近似——并且甚至这样，要从中引出预言仍是令人生畏的课题。

对历史求和中的每一个历史不只描述时空，而且描述在其中的任何东西——包括像能观察宇宙历史的人类那样复杂的生物。这可对人存原理提供另一个支持，因为如果任何历史都是可能的，就可以用人存原理去解释为何我们发现宇宙是当前这样子。对我们并不存在其中的其他历史究竟应赋予什么意义还不清楚。然而，如果利用对历史求和可以显示，我们的宇宙不只是一个可能的，而且是最有可能的历史，则这个量子引力论的观点就会令人满意得多。为此，我们必须对所有可能的没有边界的欧几里得时空进行历史求和。

人们从“无边界”假定得知，宇宙遵循大多数历史的机会是可以忽略不计的，但是有一族特别的历史比其他的历史有多得多的机会。这些历史可以描绘得像地球的表面。在那里与北极的距离代表虚的时间，并且离北极等距离的圆周长代表宇宙的空间尺度。宇宙作为单独一点从北极起始。随着人们往南走，离开北极等距离的纬度圈变大，这和宇宙随虚时间的膨胀相对应（图8.11）。宇宙在赤道处会达到最大的尺度，并且随着虚时间的继续增加而收缩，最后在南极收缩成一点。尽管宇宙在南北二极的尺度为零，但是这些点不是奇点，它们并不比地球上的北南二极更奇异。科学定律在它们那里有效，正如同它们在地球上的南北二极有效一样。



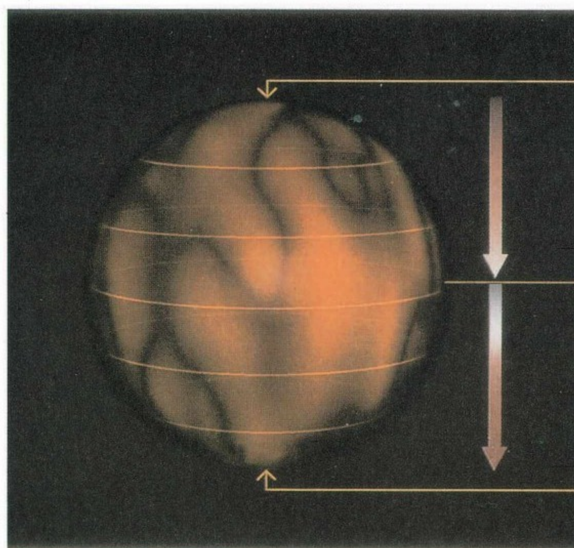


图8.11　在“无边界”设想中，宇宙在虚时间中的历史正像地球的表面：它的尺度是有限的，但是没有边界。

然而，宇宙的历史在实的时间里显得非常不一样。大约在100亿年或200亿年以前，它有一个最小的尺度，它等于历史在虚时间里的最大半径。在后来的实时间里，宇宙就会像由林德设想的混沌暴胀模型那样地膨胀（但是现在人们不必假定宇宙以某种方式从一类合适的状态产生

出来）。宇宙会膨胀到一个非常大的尺度（图8.12），并最终重新坍缩成为在实时间里看起来像是奇点的一个东西。这样，在某种意义上说，即使我们躲开黑洞，仍然是注定要毁灭的。只有当我们按照虚时间来描绘宇宙时才不会有奇点。

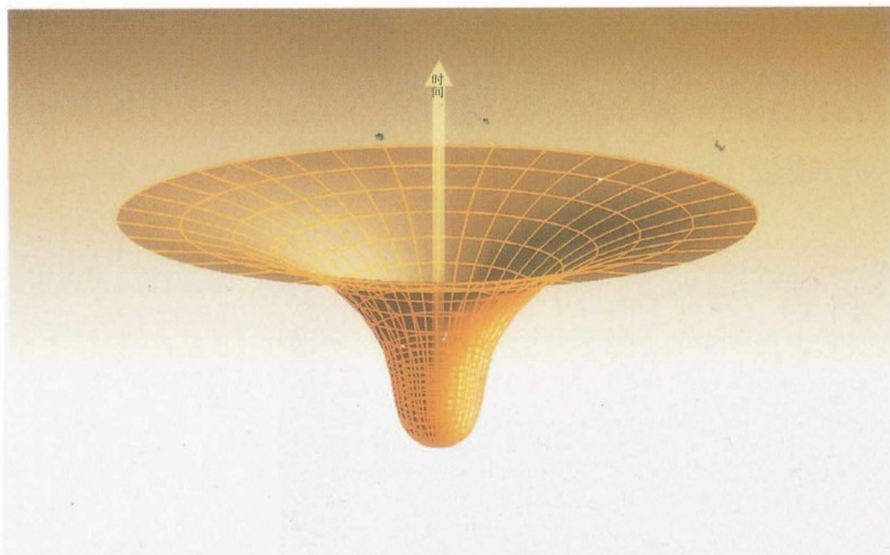


图8.12　宇宙在虚时间里如同从北极到赤道的地球表面那样膨胀，然而在实时间里以增加的暴胀率膨胀。

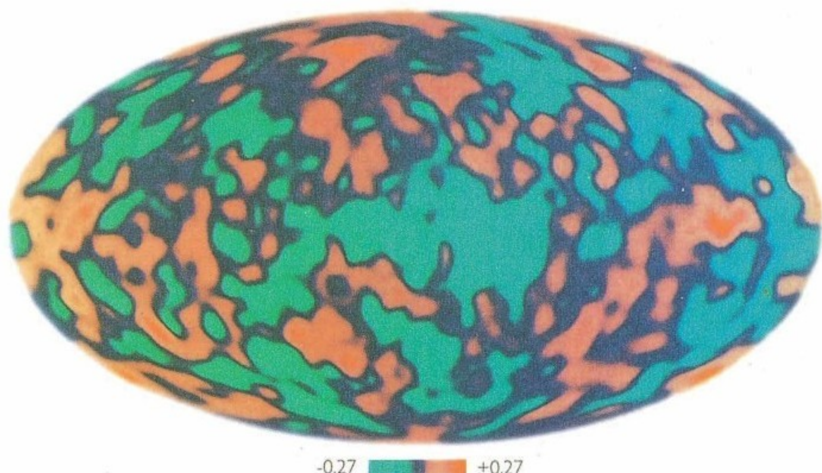
如果宇宙确实处在这样的一个量子态，宇宙在虚时间里就没有奇点。因此，我近期的工作似乎使我早期研究奇点的工作成果完全付诸东流。但是正如上面指出的，奇点定理的真正重要性在于，它们指出引力场必然会强到不能无视量子引力效应的程度。这接着导致也许在虚时间里宇宙的尺度有限但没有边界或奇点的观念。然而，当人们回到我们生活其中的实时间时，那里仍会出现奇点。陷进黑洞的那位可怜的航天员的结局仍然是极可悲的；只有当他在虚时间里生活，才不会遭遇到奇点。

上述这些也许暗示所谓的虚时间才是真正的实时间，而我们叫做实时间的东西恰恰是子虚乌有的空想的产物。在实时间中，宇宙具有开端和终结的奇点，这奇点构成了科学定律在那里失效的时空边界。但是，在虚时间里不存在奇点或边界。所以，很可能我们称作虚时间的才真正是更基本的观念，而我们称作实时间的反而是我们臆造的，它仅仅有助于我们描述我们认为的宇宙模样，如此而已。但是，按照我在第一章描

述的方法，科学理论只不过是我们用以描述自己观察的数学模型：它只存在于我们的头脑中。所以去问诸如这样的问题是毫无意义的："实的"或"虚的"时间，哪一种是实在的？这仅仅是哪一种描述更为有用的问题。

例如，人们可以计算，当宇宙具有现在密度的某一时刻，在所有方向上以几乎同等速率膨胀的概率。在迄今已被考察的简化的模型中，发现这个概率是高的；也就是说，无边界设想导致一个预言，即宇宙现在在每一方向的膨胀率几乎相同是极其可能的。这与微波背景辐射的观测相一致，它指出在任何方向上具有几乎完全同样的强度。如果宇宙在某些方向比其他方向膨胀得更快，一个附加的红移就会减小那些方向辐射的强度。

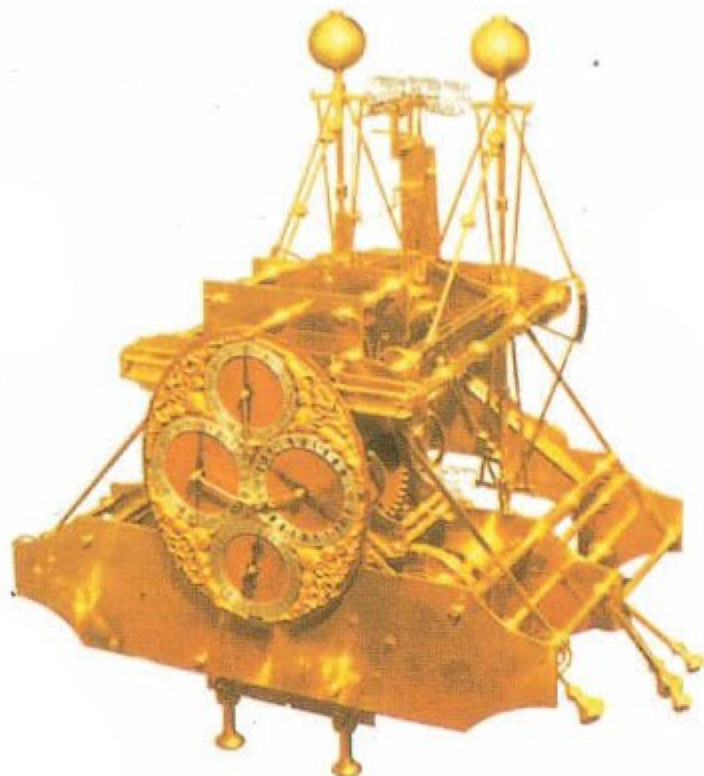
人们还可以利用对历史求和以及无边界设想去发现宇宙的哪些性质很可能人们正在研究无边界条件的进一步预言，一个特别有趣的问题是，早期宇宙中物质密度对其均匀密度的小幅度偏离。这些偏离首先引起星系，然后是恒星，最后是我们自身的形成。不确定性原理意味着，早期宇宙不可能是完全均匀的，因为粒子的位置和速度必定存在一些不确定性或起伏。利用无边界条件，我们发现，在事实上，宇宙必须恰好从由不确定性原理允许的最小可能的非均匀性开始。然后，正如在暴胀模型中预言的一样，宇宙经历了一段快速膨胀时期。在这个期间，初始的非均匀性被放大到足以解释在我们周围观察到的结构的起源。1992年宇宙背景探险者卫星（COBE）首次检测到微波背景随方向的非常微小的变化。这种非均匀性随方向的变化方式似乎和暴胀模型以及无边界设想的预言相符合。这样，在卡尔·波普的意义上，无边界设想是一种好的科学理论：它可以被观测证伪，但是它的预言却被证实了。在一个各处物质密度稍有变化的膨胀宇宙中，引力使得较紧密区域的膨胀减慢，并使之开始收缩。这就导致星系、恒星和最终甚至像我们自己这样微不足道的生物的形成。这样，宇宙无边界条件和量子力学中的不确定性原理一道，可以解释我们在宇宙中看到的所有复杂的结构。



COBE卫星观测到的微波背景中的微小温度变化图。热斑点对应于稍微更密集的区域，这些区域后来发展成为星系团。

空间和时间可以形成一个没有边界的闭曲面的思想，对于上帝在宇宙事务中的作用还有一个深远的含义。随着科学理论在描述事件方面的成功，大部分人进而相信上帝允许宇宙按照一套定律来演化，而不介入其间使宇宙触犯这些定律。然而，定律并没有告诉我们，宇宙的太初应该像什么样子——它依然要靠上帝去卷紧发条，并选择如何去启动它。只要宇宙有一个开端，我们就可以设想存在一个造物主。但是，如果宇宙的的确确是完全自足的，没有边界或边缘，它就既没有开端也没有终结：它就是存在。那么，还会有造物主存身之处吗？

第九章　时间箭头



能足够精确计算经度的第一架经线仪，1735年

我们在前几章中看到了，长期以来人们关于时间性质的观点是如何变化的。直到本世纪初（即20世纪初——编者注），人们还相信绝对时间。也就是说，每一事件可由一个称为“时间”的数以唯一的方式来标记，所有好的钟在测量两个事件之间的时间间隔上都是一致的。然而，对于任何正在运动的观察者，不管他怎么运动，光速总是一样的这一发现，导致了相对论——而在相对论中，人们必须抛弃存在一个唯一的绝对时间的观念，相反，每个观察者都有由他携带的钟记录的他自己的时间测量：不同观察者携带的钟不必要一致。这样，相对于进行测量的观察者而言，时间变成一个更个人的概念。

当人们试图统一引力和量子力学时，必须引入“虚”时间的概念。虚

时间是不能和空间方向区分的。如果一个人能往北走，他就能转过头并朝南走；同样的，如果一个人能在虚时间里向前走，他应该能够转过来并往后走。这表明在虚时间里，往前和往后之间不可能有重要的差别。另一方面，当人们考察“实”时间时，正如众所周知的，在前进和后退方向存在着非常巨大的差别。过去和将来之间的这种差别从何而来？为何我们记住过去而不是将来？



美国铯钟的管理人。标准秒是基于两个磁铁之间的蒸发的铯133原子的振动的计数

科学定律并不区别过去和将来。更精确地讲，正如前面解释的，科学定律在称作C、P和T的联合作用（或对称）下不变。（C是指用反粒子替代粒子。P的意思是取镜像，这样左和右就相互交换了。而T是指颠倒所有粒子的运动方向：事实上，是使运动倒退回去。）在所有正常情形下，制约物体行为的科学定律在CP联合对称下独自不变。换言之，对于其他行星上的居民，若他们是我们的镜像并且由反物质而不是物质构成，则生活会刚好和我们一样。

如果科学定律在CP联合作用以及CPT联合作用下都不变，它们也必须在单独的T作用下不变。然而，在日常生活的实时间中，前进和后退的方向之间还是有一个大的差异。想象一杯水从桌子上滑落下，在地板上被打碎（图9.1）。如果你将其录像，你可以容易地辨别出它是向前进还是向后退。如果将其倒放回来，你会看到碎片忽然集中到一起离开地板，并跳回到桌子上形成一个完整的杯子。你可断定录像是在倒放，因

为在日常生活中从未见过这种行为。如果发生这样的事，陶瓷业将无生意可做。

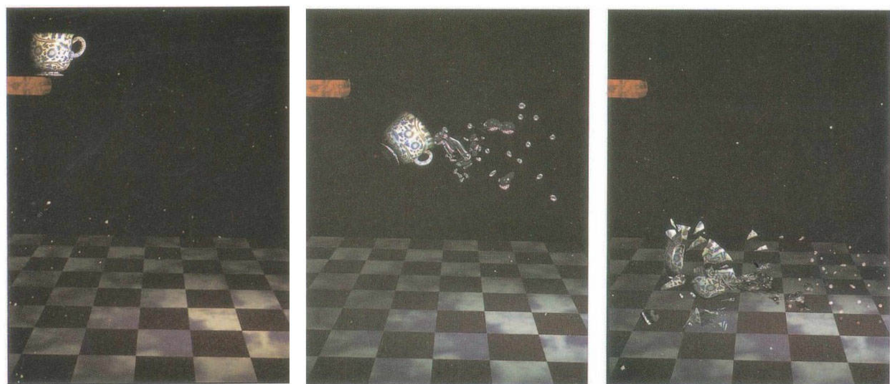


图9.1　看一个杯子在地面上破碎的录像，我们很容易知道该录像是朝前放还是往后退然而，科学定律对时间是向前进还是向后退都是相同的。

为何我们从未看到破碎的杯子集合起来，离开地面并跳回到桌子上，通常的解释是这违背了热力学第二定律。它可表述为，在任何闭合系统中无序度或熵总是随时间而增加。换言之，它是穆菲定律的一种形式：事情总是越变越糟！桌面上一个完整的杯子是一个高度有序的状态，而地板上破碎的杯子是一个无序的状态。人们很容易从早先桌子上的杯子变成后来地面上的碎杯子，而不是相反。

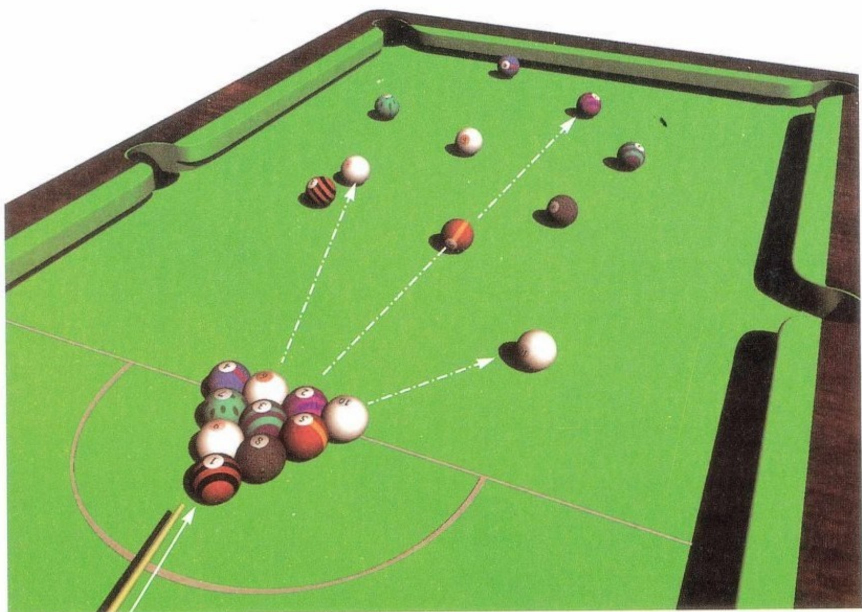


图9.2　康乐球是一个闭合的系统：一开始球处于一种高度有序的状态。但是，一旦游戏开始，球就变得无序，人们要想打一棍而使所有球回到它们开始的位置是极不可能的。

无序度或熵随着时间增加是所谓的时间箭头的一个例子：时间箭头将过去和将来区别开来，使时间有了方向。至少有三种不同的时间箭头：首先是热力学时间箭头，即是在这个时间方向上无序度或熵增加；然后是心理学时间箭头，这就是我们感觉时间流逝的方向，在这个方向上我们可以记忆过去而不是未来；最后，是宇宙学时间箭头，宇宙在这个方向上膨胀，而不是收缩（见图9.3）。

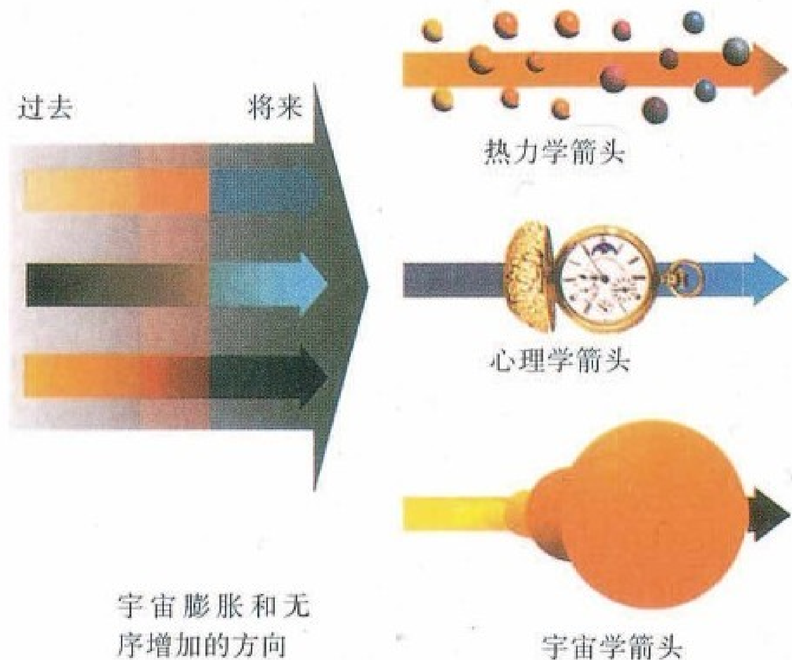


图9.3　至少存在3种时间箭头：无序度增加的方向，我们感觉时间流逝的方向，以及宇宙尺度增大的方向。

我将在这一章论断，宇宙的无边界条件和弱人存原理一起能解释为何所有的三个箭头指向同一方向——此外，为何必须存在一个定义得很好的时间箭头。我将论证热力学箭头确定心理学箭头，并且这两种箭头必须总是指向相同的方向。如果人们假定宇宙的无边界条件，我们将看到必然存在定义得很好的热力学和宇宙学时间箭头。但对于宇宙的整个历史来说，它们并不总是指向同一方向。然而，我将论断，只有当它们指向一致时，对于能够发问为何无序度在宇宙膨胀的时间方向上增加的智慧生命的发展，才有合适的条件。

首先，我要讨论热力学时间箭头。总存在着比有序状态多得多的无序状态的这一事实，导致热力学第二定律。譬如，考虑一盒拼板玩具，存在一个并且只有一个使这些小纸片拼成一幅完整图画的排列。另一方面，存在巨大数量的排列，这时小纸片是无序的，不能拼成一幅画。

假设一个系统从这少数的有序状态之一出发。随着时间流逝，这个系统将按照科学定律演化，而且它的状态将改变。到后来，因为存在着更多的无序状态，它处于无序状态的可能性比处于有序状态更大。这样，如果一个系统服从一个高度有序的初始条件，它的无序度就会随着

时间的增加而增大。

假定拼板玩具盒的纸片从排成一幅图画的有序组合开始，如果你摇动这盒子，这些纸片将会采用其他组合，这很可能是一个不形成一幅合适图画的无序的组合，就是因为存在多得多的无序的组合。有一些纸片团仍可能形成部分图画，但是你越摇动盒子，这些团就越可能被分开，这些纸片将处于完全混乱的状态，在这种状态下它们不能形成任何种类的图画。这样，如果纸片从一个高度有序的状态的初始条件出发，纸片的无序度将可能随时间而增加。

然而，假定上帝决定不管宇宙从何状态开始，它都必须结束于一个高度有序的状态，则在早期这宇宙很可能处于无序的状态。这意味着无序度将随时间而减小。你将会看到破碎的杯子集合起来并跳回到桌子上。然而，任何观察杯子的人都生活在无序度随时间减小的宇宙中，我将论断这样的人会有一个倒溯的心理学时间箭头。这就是说，他们会记住将来的事件，而不是过去的事件。当杯子被打碎时，他们会记住它在桌子上的情形；但是当它在桌子上时，他们不会记住它在地面上的情景。

由于我们不知道大脑工作的细节，所以谈论人类的记忆是相当困难的。然而，我们确实完全知道计算机的记忆器是如何工作的。因此，我将讨论计算机的心理学时间箭头。我认为，可以合理假定计算机和人类有相同的箭头。如果不是这样，人们可能因为拥有一台记住明天价格的计算机而在股票交易中大发利市！

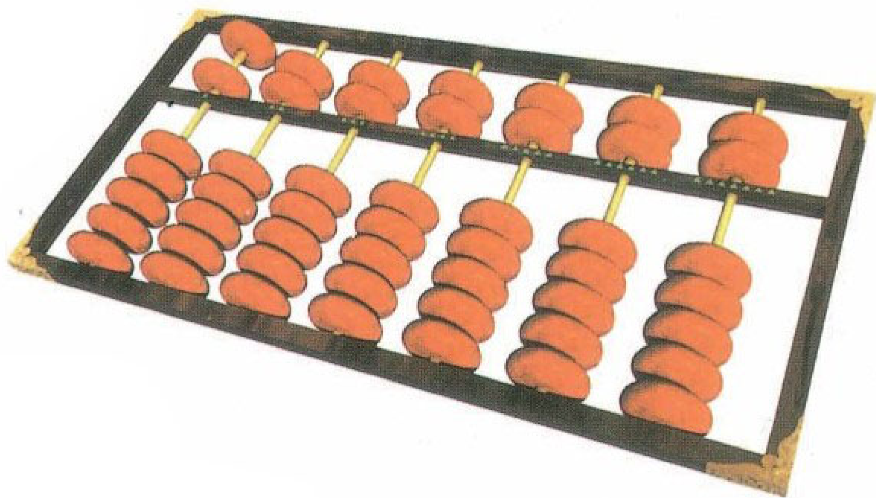


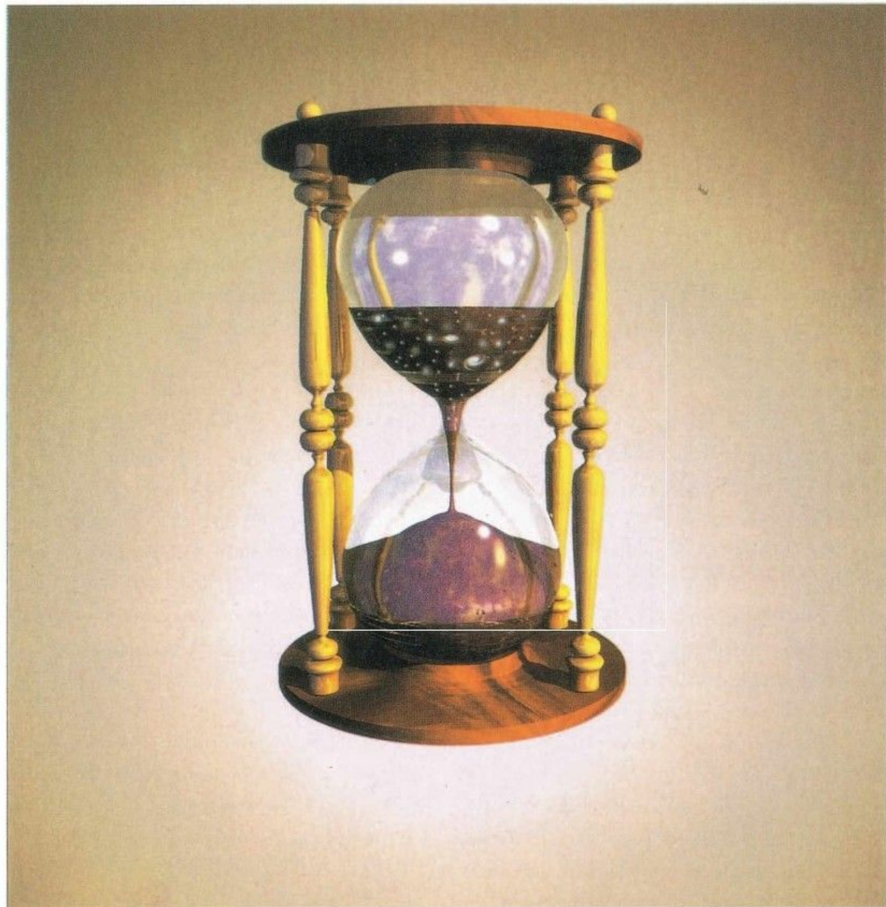
图9.4　算盘的原理和计算机表储器很类似。每个算盘珠可处于两个位置的一个：改变算盘珠的位置需要一定的能量。

大体来说，计算机的记忆器是一个包含可处于两种状态中的任一种的元件的设备，算盘是一个简单的例子。其最简单的形式是由许多铁条组成；每一根铁条上有一念珠，此念珠可呆在两个位置中的一个。在计算机记忆器进行存储之前，其记忆器处于无序态，念珠等几率地处于两个可能的状态中。（算盘珠杂乱无章地散布在算盘的铁条上。）在记忆器和要记忆的系统相互作用后，根据系统的状态，它肯定处于这种或那种状态（每个算盘珠将要么位于铁条的左边，要么处于右边）。这样，记忆器就从无序态转变成有序态。然而，为了保证记忆器处于正确的状态，需要使用一定的能量（例如，移动算盘珠或给计算机接通电源）。这能量以热的形式耗散了，从而增加了宇宙的无序度的量。人们可以证明，这个无序度增量总比记忆器本身有序度的增量大。这样，由计算机冷却风扇排出的热量表明计算机将一个项目记录在它的记忆器中时，宇宙的无序度的总量仍然增加。计算机记忆过去的时间方向和无序度增加的方向是一致的。

因此，我们对时间方向的主观感觉或心理学时间箭头，是在我们头脑中由热力学时间箭头决定的。正像一台计算机，我们必须在熵增加的顺序上将事物记住。这几乎使热力学定律变成为无聊的东西。无序度随时间的增加乃是因为我们是在无序度增加的方向上测量时间。你不可能有比这个更具胜算的打赌了！

但是究竟热力学时间箭头为何必须存在呢？或换句话说，在我们称之为过去的时间的一端，宇宙为何处于高度有序的状态呢？它为何不在所有时间里处于完全无序的状态呢？毕竟这似乎更为可能还有，为何无序度增加的时间方向和宇宙膨胀的方向相同？

在经典广义相对论中，因为所有已知的科学定律在大爆炸奇点处崩溃，人们不能预言宇宙是如何开始的。宇宙可以从一个非常光滑和有序的状态开始。这就会导致正如我们观察到的，定义很好的热力学和宇宙学的时间箭头。但是，它也可以同样合理地从一个非常波浪起伏的无序状态开始。在那种情况下，宇宙已经处于一种完全无序的状态，所以无序度不会随时间增加。它要么保持常数，这时就没有定义得很好的热力学时间箭头；它要么会减小，这时热力学时间箭头就会和宇宙学时间箭头反向。这些可能性的任一种都不符合我们观察到的情况。然而，正如我们看到的，经典广义相对论预言了它自身的崩溃。当时空曲率变大时，量子引力效应变得重要，而经典理论不再能很好地描述宇宙。人们必须用量子引力论去理解宇宙是如何开始的。



时间之沙只往一个方向流动，当宇宙的更漏倒置时，这个方向会改变吗？

正如我们在上一章看到的，在量子引力论中，为了指定宇宙的态，人们仍然必须说清宇宙的可能历史在过去的时空边界是如何行为的。只有当这些历史满足无边界条件，人们才可能避免这个不得不描述我们不知道和无法知道的东西的困难：它们在尺度上有限，但是没有边界、边缘或奇点。在这种情形下，时间的开端就会是规则的光滑的时空的点，并且宇宙在一个非常光滑和有序的状态下开始它的膨胀。它不可能是完全均匀的，否则就违反了量子理论的不确定性原理。必然存在粒子密度和速度的微小起伏，然而无边界条件意味着，这些起伏又是在与不确定性原理相一致的条件下尽可能的小。

宇宙刚开始时有一个指数膨胀或“暴胀”时期，在这期间它的尺度增加了一个非常大的倍数。在这个膨胀过程时，密度起伏起初一直很小，但是后来开始变大。在密度比平均值稍大的区域，额外质量的引力吸引

使膨胀速度放慢。最终，这样的区域停止膨胀，并坍缩形成星系、恒星以及像我们这样的生命。宇宙开始时处于一个光滑有序的状态，而随时间演化成波浪起伏的无序的状态。这就解释了热力学时间箭头的存在。

如果宇宙停止膨胀，并且开始收缩，将会发生什么呢？热力学箭头会不会倒转过来，而无序度开始随时间减少呢？这为从膨胀相存活到收缩相的人们留下了五花八门的类科学幻想的可能性，他们是否会看到杯子的碎片集合起来，离开地板，并跳回到桌子上去呢？他们会不会记住明天的价格，并在股票市场上发财致富？由于宇宙至少要再等100亿年之后才开始收缩，忧虑那时会发生什么似乎有点学究气。但是有一种更快的办法去查明将来会发生什么：跳到黑洞里面去。恒星坍缩形成黑洞的过程和整个宇宙坍缩的后期相当类似。这样，如果在宇宙的收缩相无序度减小，可以预料它在黑洞里面也会减小。所以，一个落到黑洞里去的航天员在下赌注之前，也许能依靠记住轮赌盘上球儿的走向而赢钱。（然而，不幸的是，玩不了多久，他就会变成意大利面条。他也不能使我们知道热力学箭头的颠倒，或者甚至将他赢的钱存入银行，因为他被困在黑洞的事件视界后面。）

起初，我相信在宇宙坍缩时无序度会减小。这是因为，我认为宇宙再次变小时，它必须回到光滑和有序的状态。这表明，收缩相就像是膨胀相的时间反演。处在收缩相的人们将以倒退的方式生活：他们在出生之前即已死去，并且随着宇宙收缩变得更年轻。

这个观念是吸引人的，因为它表明在膨胀相和收缩相之间存在一个漂亮的对称。然而，人们不能不顾及有关宇宙的其他观念，而只采用这个观念。问题在于：无边界条件是否隐含着这个对称，或者它是否与这个条件不相协调？正如我说过的，我起先以为无边界条件确实意味着无序度会在收缩相中减小。我之所以被误导，部分是由于与地球表面的类比引起的。如果人们将宇宙的开初对应于北极，那么宇宙的终结就应该类似于它的开端，正如南极之与北极相似。然而，南北二极对应于虚时间中的宇宙的开端和终结。在实时间里的开端和终结之间可有非常大的差异。我还被我作过的一项简单的宇宙模型的研究误导，在此模型中坍缩相似乎是膨胀相的时间反演。然而，我的一位合作者，宾夕法尼亚州立大学的唐·佩奇指出，无边界条件没有要求收缩相必然是膨胀相的时间反演。我的一个学生雷蒙·拉夫勒蒙进一步发现，在一个稍复杂的模型中，宇宙的坍缩和膨胀非常不同。我意识到自己犯了一个错误：无边界

条件意味着，事实上在收缩相时无序度继续增加。当宇宙开始收缩时或在黑洞中，热力学和心理学时间箭头不会反向。



如果在收缩的宇宙中热力学时间箭头被颠倒，那么毁坏的大楼会从废墟中立起，而且人们在衰老中诞生，在年轻时“死亡”

当你发现自己犯了像这样的错误后该如何办？有些人从不承认他们是错误的，而继续去找新的往往相互不协调的论据为自己辩解——如爱丁顿在反对黑洞理论时之所为。另外一些人首先宣称，从来没有真正支持过不正确的观点，如果他们支持了，也只是为了显示它是不协调的。在我看来，如果你在出版物中承认自己错了，那会好得多并少造成混乱。爱因斯坦即是一个好的榜样，他在试图建立一个静态的宇宙模型时引入了宇宙常数，他称此为一生中最大的错误。

回头再说时间箭头，余下的问题是：为何我们观察到热力学和宇宙学箭头指向同一方向？或者换言之，为何无序度增加的时间方向正是宇宙膨胀的时间方向？如果人们相信，按照无边界设想似乎隐含的那样，宇宙先膨胀然后重新收缩，那么为何我们应在膨胀相中而不是在收缩相中，这就成为一个问题。

人们可以在弱人存原理的基础上回答这个问题。收缩相的条件不适合智慧人类的存在，而正是他们能够提出这个问题：为何无序度增加的时间方向和宇宙膨胀的时间方向相同？无边界设想预言的宇宙在早期阶段的暴胀意味着，宇宙必须以非常接近为恰好避免坍缩所需要的临界速率膨胀，这样它在很长的时间内才不至于坍缩。到那时候所有的恒星都会烧尽，而在其中的质子和中子可能会衰变成轻粒子和辐射。宇宙将处于几乎完全无序的状态，这时就不会有强的热力学时间箭头。由于宇宙已经处于几乎完全无序的状态，无序度不会增加很多。然而，对于智慧

生命的行动来说，一个强的热力学箭头是必需的。为了生存下去，人类必须消耗能量的一种有序形式——食物，并将其转化成能量的一种无序形式——热量，这样智慧生命不能在宇宙的收缩相中存在。这就解释了为何我们观察到热力学和宇宙学的时间箭头指向一致。并不是宇宙的膨胀导致无序度的增加，而是无边界条件引起无序度的增加，并且只有在膨胀相中才有适合智慧生命的条件。

总之，科学定律并不能区分前进和后退的时间方向。然而，至少存在三个时间箭头，将过去和将来区分开来。它们是热力学箭头，这就是无序度增加的时间方向；心理学箭头，即是在这个时间方向上，我们能记住过去而不是将来；还有宇宙学箭头，也即宇宙膨胀而不是收缩的方向。我指出了心理学箭头本质上应和热力学箭头相同。宇宙的无边界设想预言了存在定义得很好的热力学时间箭头，因为宇宙必须从光滑的有序的状态开始。并且我们看到，热力学箭头和宇宙学箭头的一致，乃是由于智慧生命只能在膨胀相中存在。因为在收缩相那里没有强的热力学时间箭头，所以不适合智慧生命的存在。

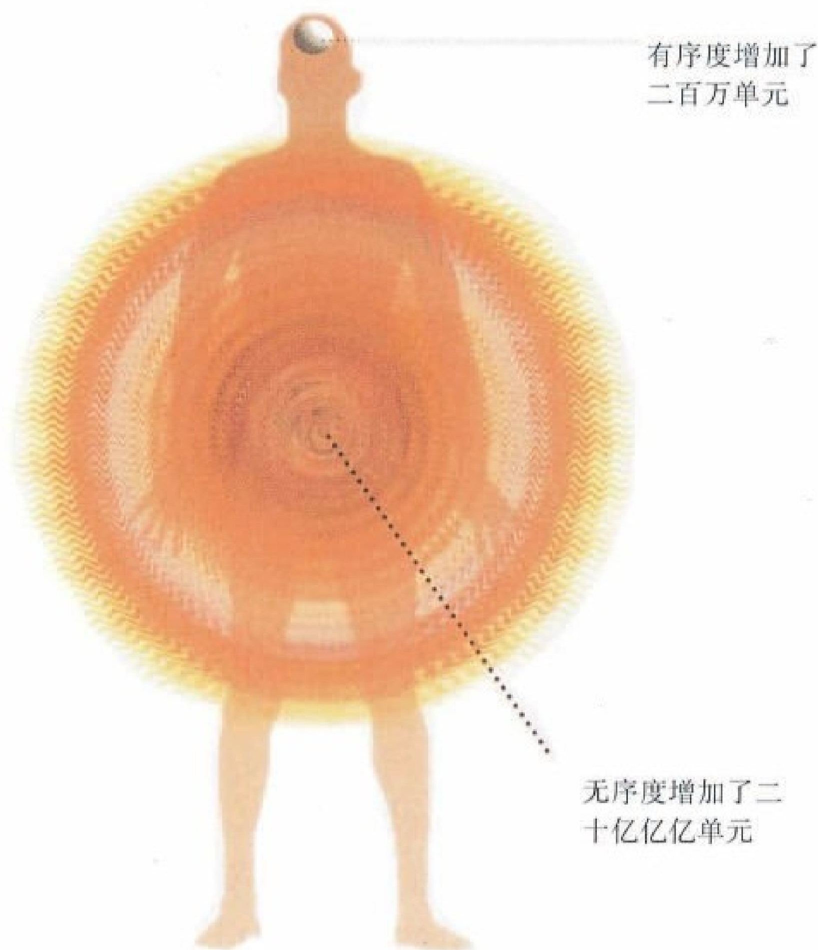
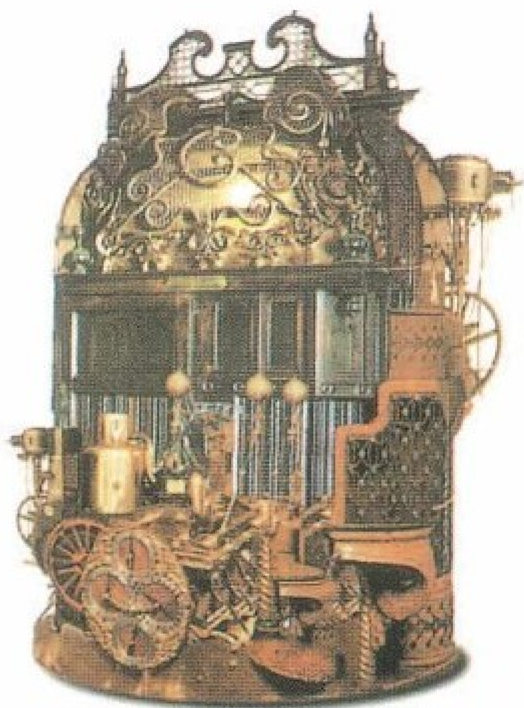


图9.5　阅读本书使你头脑中的有序信息量增加了。然而，同时由你身体释放出来的热对于增加宇宙的其余部分的无序度将有大得多的效应。我建议你现在停止阅读。

人类理解宇宙的进步，在一个无序度增加的宇宙中建立了一个很小的有序的角落。如果你记住了这本书中的每一个词，你的记忆就记录了大约200万单位的信息——你头脑中的有序度就增加了大约200万单位。然而，当你读这本书时，你至少将以食物为形式的1千卡路里（1热化学卡＝4.184J）的有序能量，以对流和出汗释放到你周围空气中的热量的形式，换成为无序能量（图9.5）。这就将宇宙的无序度增大了大约20亿亿亿单位，或大约是你头脑中有序度增量——那是如果你记住这本书的每一件事的话——的1000亿亿倍。我试图在下面各章再增加一些我们

头脑的有序度，解释人们如何将我描述过的部分理论结合一起，形成一个完备的统一理论，这个理论将适用于宇宙中的任何东西。

第十章　虫洞和时间旅行



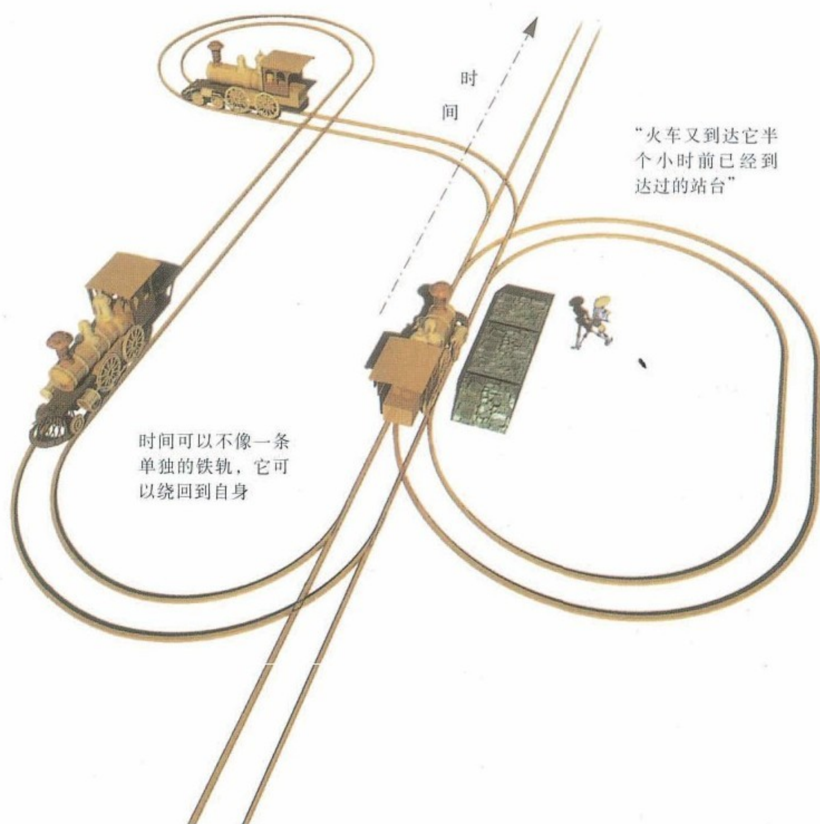
英国作家H·G·韦尔斯的《时间机器》是探讨时间旅行思想的第一本科学幻想著作。

我们在上一章讨论了，为什么我们看到时间向前进，为什么无序度增加，并且我们记住过去而非将来。时间好像是一条笔直的铁轨，人们只能往一个方向前进。

如果该铁轨有环圈以及分岔，使得一直往前开动的火车却返回原先通过的车站，这是怎么回事呢（图10.1）？人们能否旅行到未来或过去吗？

H·G·韦尔斯在《时间机器》中，正好像其他无数的科学幻想作家那样，探讨了这些可能性。科学幻想的许多观念，诸如潜水艇以及飞往月亮等都已变成了科学的事实。那么，时间旅行的前景如何呢？

1949年库尔特·哥德尔发现了广义相对论允许的新的时空。这首次表明物理学定律的确允许人们在时间里旅行。哥德尔是一名数学家，他由于证明了不完备性定理而名震天下。该定理是说，不可能证明所有真的陈述，即使你只试图证明像算术这么明确而且枯燥的学科中所有真的陈述。这个定理也许是我们理解和预言宇宙能力的基本极限，然而至少迄今，它似乎还未成为我们寻求完备统一理论的障碍。



哥德尔在和爱因斯坦于普林斯顿高级学术研究所度过他们晚年时通晓了广义相对论。他的时空具有一个古怪的性质：整个宇宙都在旋转。人们也许会问：“它相对于何物旋转？”其答案是远处的物体围绕着小陀螺或者陀螺仪的指向旋转。

这导致一个附加的效应，一位航天员可能在他乘火箭飞船出发之前即已回到地球。这个性质使爱因斯坦非常沮丧，他曾经以为广义相对论不允许时间旅行。然而，鉴于爱因斯坦对引力坍缩和不确定性原理的无

端反对，这也许反而是一个令人鼓舞的迹象。因为我们可以证明，我们生存其中的宇宙是不旋转的，所以哥德尔找到的解并不对应于它。它还有一个非零的宇宙常数。宇宙常数是当爱因斯坦以为宇宙是不变时引进的。在哈勃发现了宇宙的膨胀后，就不再需要宇宙常数，而现在普遍认为它应为零。然而，之后从广义相对论又找到其他一些更合理的时空，它们允许旅行到过去。其中之一即是旋转黑洞的内部。另外一种是包含两根快速相互穿越的宇宙弦的时空。顾名思义，宇宙弦是弦状的物体，它具有长度，但是截面很微小。实际上，它们更像在巨大张力下的橡皮筋，其张力大约为1亿亿亿吨。把一根宇宙弦系到地球上，就会把地球在三十分之一秒的时间里从每小时零英里加速到每小时60英里。宇宙弦初听起来像是科学幻想物，但有理由相信，在早期宇宙中由在第五章讨论过的那种对称破缺机制可以形成宇宙弦。因为宇宙弦具有巨大的张力，而且可以从任何形态起始，所以它们一旦伸展开来，就会加速到非常高的速度。

哥德尔解和宇宙弦时空一开始就这么扭曲，使得总能旅行到过去。上帝也许会创生了一个如此卷曲的宇宙，但是我们没有理由相信他会这样做。微波背景和氢元素丰度的观测表明，早期宇宙并没有允许时间旅行的曲率。如果无边界设想是正确的，从理论的基础上也能导出这个结论。这样问题就变成：如果宇宙初始就没有时间旅行必需的曲率，我们能否随后把时空的局部区域卷曲到这种程度，直至允许时间旅行？

快速恒星际或星系际旅行是一个密切相关的，也是科学幻想作家关心的问题。根据相对论，没有东西比光运动得更快。因此，如果我们向我们最近邻的恒星——半人马座α——发送航天飞船，由于它大约在4光年那么远，所以我们预料至少要8年才能等到旅行者们回来报告他们的发现。如果要去银河系中心探险，至少要10万年才能返回。相对论确实给了我们一些宽慰。这就是在第二章提及的双生子佯谬。

因为时间不存在唯一的标准，而每一位观察者都拥有他自己的时间。这种时间是用他携带的时钟来测量的，这样航程对于空间旅行者比对于留在地球上的人显得更短暂是可能的。但是，这对于那些只老了几岁的返回的空间旅行者，并没有什么值得高兴的，因为他发现留在地球上的亲友们已经死去几千年了。这样，科学幻想作家为了使人们对他们的故事有兴趣，必须设想有朝一日我们能运动得比光还快。这些作家中的大部分并未意识到的是，如果你能运动得比光还快，相对论意味着，

你就能向时间的过去运动，正如以下五行打油诗描写的那样：

有位年轻小姐名怀特，

她能行走得比光还快。

她以相对性的方式，

在当天刚刚出发，

却已在前晚到达。

关键在于相对论认为不存在让所有观察者同意的唯一的时间测量。相反，每位观察者各有自己的时间测量。如果一枚火箭能以低于光的速度从事件A（譬如2012年奥林匹克竞赛的100米决赛）至事件B（譬如半人马座α议会第100004届会议的开幕式），那么根据所有观察者的时间，他们都同意事件A发生于事件B之先（图10.2）。然而，假定飞船必须以超过光的速度旅行才能把竞赛的消息送到议会。那么，以不同速度运动的观察者关于事件A和事件B何为前何为后就众说纷纭。按照一位相对于地球静止的观察者的时间，议会开幕也许是在竞赛之后。这样，这位观察者会认为，如果他不理光速限制的话，该飞船能及时地从A赶到B。然而，在半人马座α上以接近光速在离开地球方向飞行的观察者就会觉得事件B即议会开幕，先于事件A即百米决赛发生（图10.3）。相对论告诉我们，对于以不同速度运动的观察者，物理定律是完全相同的。

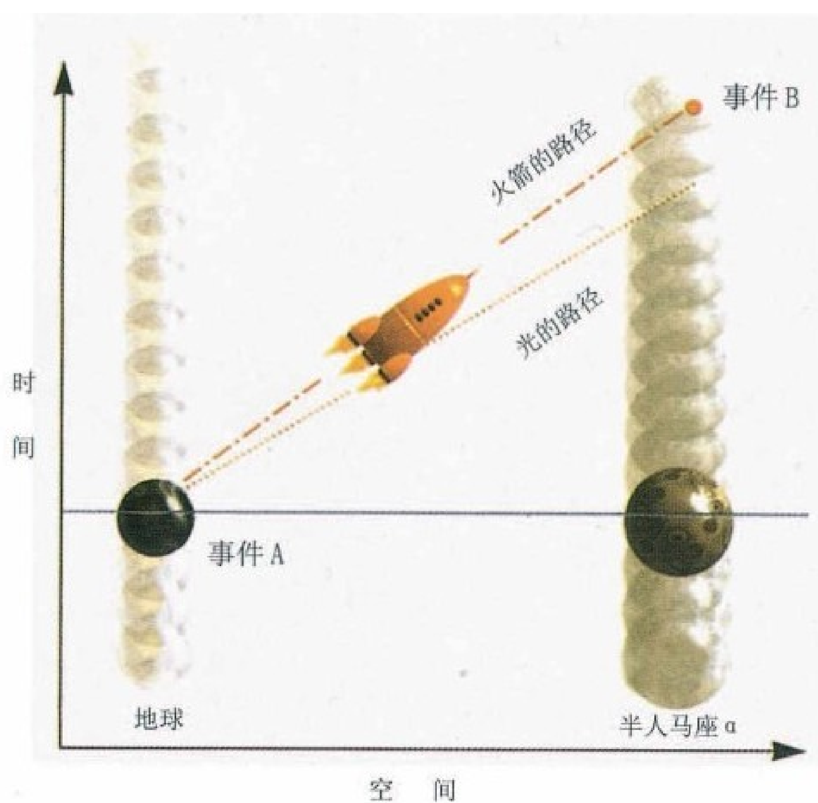
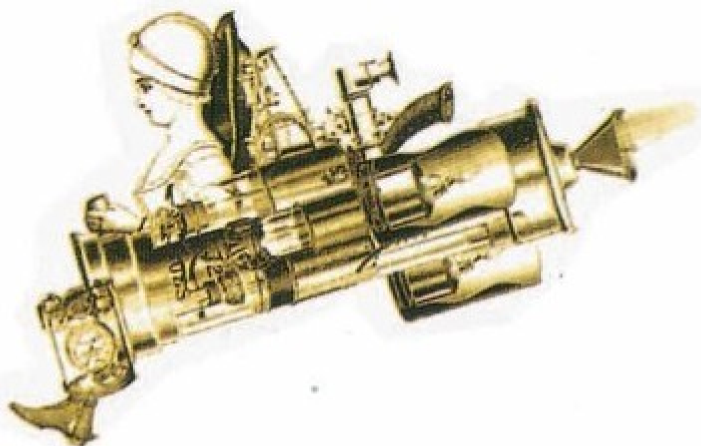


图10.2　如果一个火箭能以低于光速的速度从地球上的事件A旅行到半人马座α上的事件B，则所有观察者都同意事件A先于事件B发生。



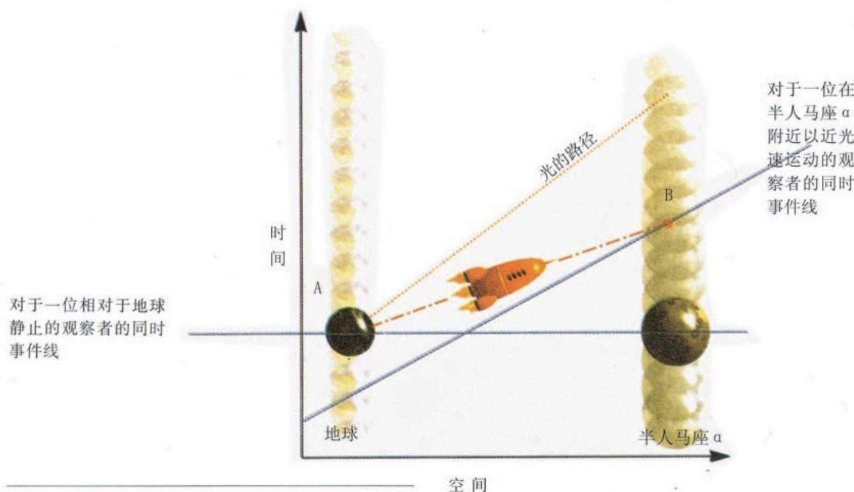


图10.3　如果一个火箭从A到B不可能以低于光速运动，以不同速度运动的观察者对于哪个事件先发生有不同意见。

这已被实验很好地检验过。人们认为，即使用更高级的理论去取代相对论，它仍然会被作为一个特性保留下来。这样，如果超光速旅行是可能的，运动的观察者会说，就有可能从事件B即议会开幕式，赶到事件A即百米竞赛。如果他运动得更快一些，他甚至还来得及在赛事之前赶回，并在得知谁是赢家的情形下放下赌金。

要打破光速壁垒存在一些问题。相对论告诉我们，飞船的速度越接近光速，用以对它加速的火箭功率就必须越来越大。对此我们已有实验的证据，但不是航天飞船的经验，而是在诸如费米实验室或者欧洲核子研究中心的粒子加速器中的基本粒子的经验。我们可以把粒子加速到光速的99.99%，但是不管我们注入多少功率，也不可能把它们加速到超过光速壁垒。航天飞船的情形也是类似的：不管火箭有多大功率，也不可能加速到光速以上。

这样看来，快速空间旅行和逆时旅行似乎都不可行了。然而，还可能有办法。人们也许可以把时空卷曲起来，使得A和B之间有一近路。在A和B之间创生一个虫洞就是一个法子。顾名思义，虫洞就是一个时空细管，它能把两个相隔遥远的几乎平坦的区域连接起来（图10.4）。

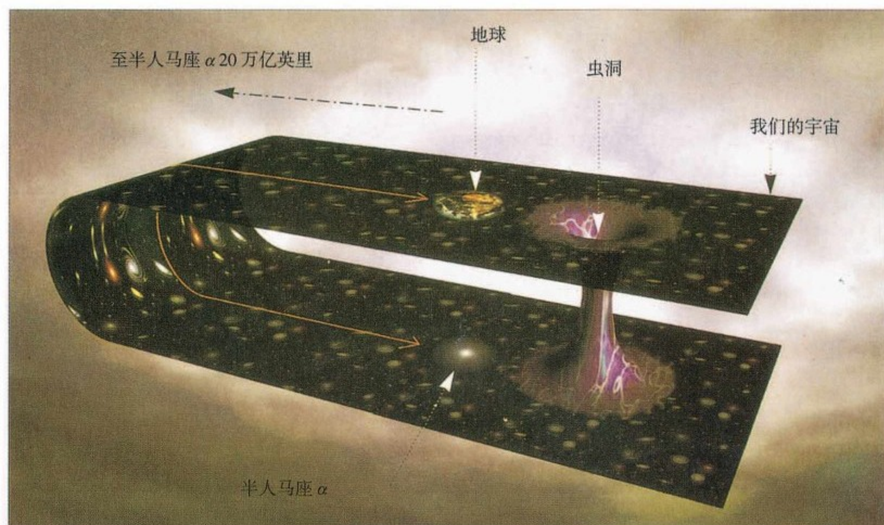


图10.4　虫洞可为几乎平坦的时空的两个遥远区域之间的跨跃提供捷径

虫洞两个端点之间在几乎平坦的背景里的分离和通过虫洞本身的距离之间没必要有什么关系。这样，人们可以想象，他可以创造或者找到一个从太阳系附近通到半人马座α的虫洞。虽然在通常的空间中地球和半人马座α相隔20万亿英里，而通过虫洞的距离却只有几百万英里。这就允许百米决赛的消息赶在议会开幕式到达。然后一位往地球飞去的观察者也应该能找到另一个虫洞，使他从半人马座α议会开幕在赛事之前回到地球（图10.5）。这样，虫洞正和其他可能的超光速旅行方式一样，允许人们逆时旅行。

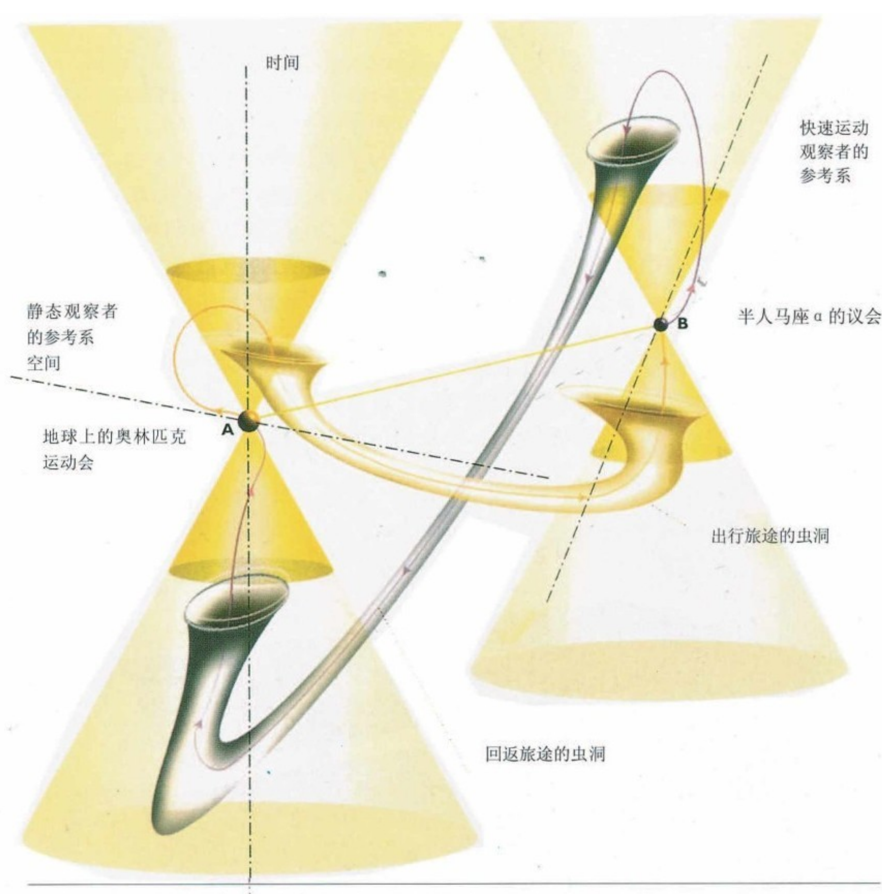


图10.5　一位空间旅行者可以利用相对于地球静止的虫洞作为从事件A到B的捷径，然后通过一个运动的虫洞返回，并且在他出发之前回到地球。

时空不同区域之间的虫洞的思想并非科学幻想作家的发明，它的起源是非常令人尊敬的。

1935年爱因斯坦和纳珍·罗森写了一篇论文。在该论文中他们指出广义相对论允许他们称为“桥”，而现在称为虫洞的东西。爱因斯坦·罗森桥不能维持得足够久，使得航天飞船来得及穿越：虫洞会缩紧，而飞船会撞到奇点上去（图10.7）。然而，有人提出，一个先进的文明可能使虫洞维持开放。可以这样做，或者把时空以其他方式卷曲，使它允许时间旅行，人们可以证明，这需要一个负曲率的时空区域，如同一个马鞍面（图10.6）。通常的物质具有正能量密度，赋予时空以正曲率，如同一个球面。这样，为了使时空卷曲成允许逆时旅行的样子，人们需要负能量密度的物质。



图10.7　通常物质赋予时空以正的曲率，正如一个球面。为了允许旅行到过去，时空必须具有负的曲率，正如一个马鞍面。



图10.6　爱因斯坦-罗森桥是能连接遥远地区的虫洞，但它们不能保持畅通足够久，以使任何东西通过。

能量有点像金钱：如果你有正的余额，就可以用不同方法分配，但是根据本世纪初（即20世纪初——编者注）相信的经典定律，你不允许透支。这样，这些经典定律排除了时间旅行的任何可能性。然而，正如在前面几章描述的，以不确定性原理为基础的量子定律已经超越了经典定律。量子定律更慷慨些，只要你总的余额是正的，你就允许从一个或两个账号透支。换言之，量子理论允许在一些地方的能量密度为负，只要它可由在其他地方的正的能量密度所补偿，使得总能量保持为正的。量子理论允许负能量密度的一个例子是所谓的卡西米尔效应（图10.8）。正如我们在第七章看到的，甚至我们认为是“空虚的”空间也充满了虚的粒子和反粒子对，它们一起出现相互分离，再返回一起，并且相互湮灭。现在，假定人们有两片距离很近的平行金属板。金属板对于虚光子或光的粒子起着类似镜子的作用。事实上，在它们之间形成了一个空腔，它有点像风琴管，只对指定的音阶共鸣。这意味着，只有当平板间的距离是虚光子波长（相邻波峰之间的距离）的整数倍时，这些虚光子才会发生在平板之中的空间。如果空腔的宽度是波长的整数倍再加上部分波长，那么在前后反射多次后，一个波的波峰就会和另一个的波谷重合，这样波动就被抵消了。

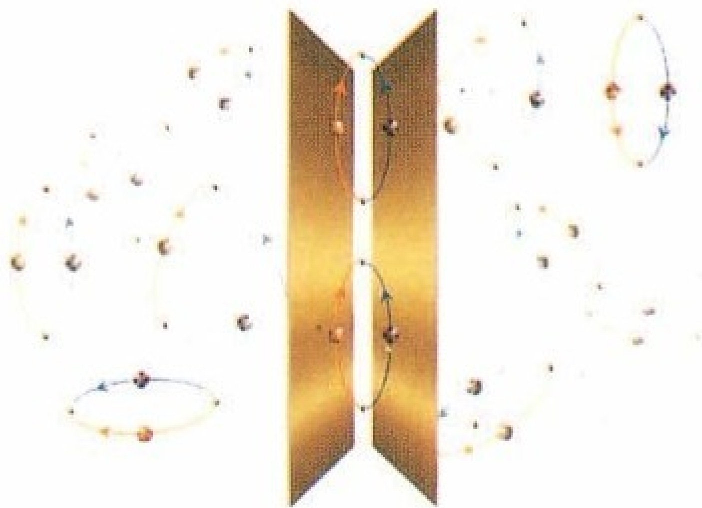


图10.8　空的空间“充满”了虚粒子和虚反粒子。对于这些粒子一对金属板作用犹如镜子，在它们之间只允许具有一定共振波长的虚对。这就是所谓的卡西米尔效应。

因为平板之间的虚光子只能具有共振的波长，所以虚光子的数目比在平板之外的区域要略少些，在平板之外的虚光子可以具有任意波长。这样，撞击在平板内表面的虚光子比外表面的略少一些。因此，人们可以预料到这两片平板遭受到把它们往里挤的力。实际上已经测量到这种力，并且和预言的值相符。这样，我们得到了虚粒子存在并具有实在效应的实验证据。

在平板之间存在更少虚光子的事实意味着，它们的能量密度比它处更小。但是在远离平板的“空虚的”空间的总能量密度必须为零，因为否则的话，能量密度会把空间卷曲起来，而不能保持几乎平坦。这样，如果平板间的能量密度比远处的能量密度更小，它就必须为负的这样，我们对以下两种现象都获得了实验的证据。第一，从日食时的光线偏折得知时空可以被卷曲。第二，从卡西米尔效应得知时空可被弯曲成允许时间旅行的样子。所以，人们也许希望，随着科学技术的推进，我们最终能够造出时间机器。但是，如果这样的话，为什么从来没有一个来自未来的人回来告诉我们如何实现呢？鉴于我们现在处于初级发展阶段，也许有充分理由认为，让我们分享时间旅行的秘密是不智的。除非人性得到彻底改变，非常难以相信，某位从未来飘然而至的访客会贸然泄漏天机。当然，有些人会宣称，观察到幽浮（UFO）就是外星人或者来自未

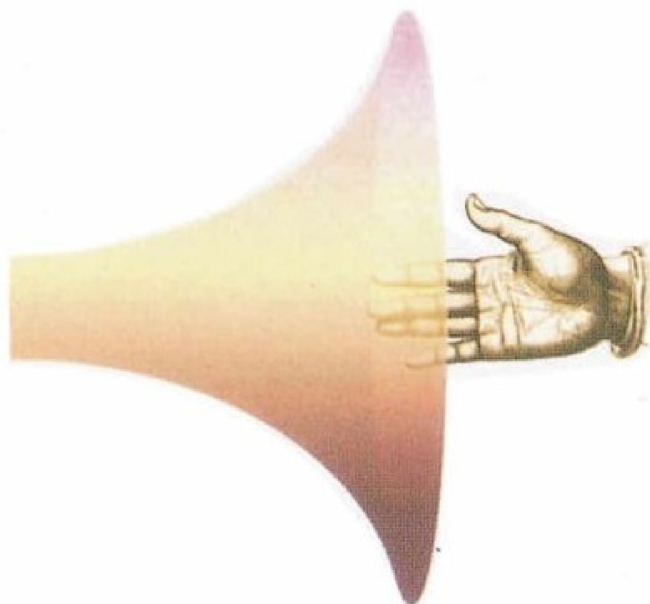
来的人们来访的证据。（如果外星人在合理的时间内到达此地，他们则需要超光速旅行，这样两种可能性其实是等同的。）



然而，我认为，任何外星来的或者来自未来的人的造访应该是更明显得多，或许更加令人不悦得多。如果他们全然有意显灵的话，为何只对那些被认为不太可靠的证人进行？如果他们试图警告我们大难临头，这样做也不是非常有效的。

未曾有过对来自未来的访客，这可以用以下方法解释，因为我们观察了过去，并且发现它并没有允许从未来旅行返回必需的那类卷曲，所以过去是固定的。另一方面，未来是未知的开放的，所以也可能有需要的曲率。这意味着，任何时间旅行都被限制于未来。此时此刻，柯克船长和探险号星际飞船没有机会来临。

这也许可以解释，当今世界为何还没被来自未来的游客充斥。但是如果可能回到以前并改变历史，则不能够回避引起的问题。例如，假定你回到过去并且将你的曾曾祖父在他仍为孩童时杀死。这类佯谬有许多版本，但是它们根本上是等效的：如果一个人可以自由地改变过去，则他就会遇到矛盾。



1997

假定你回到以前，当你的先祖父还是小孩时将他杀死。

看来有两种方法解决由时间旅行导致的佯谬。我把一种称为协调历史方法。它是讲，甚至当时空被卷曲得可能旅行到过去时，在时空中发生的必须是物理定律的协调的解。根据这个观点，除非历史表明，你曾经到达过去，并且当时并没有杀死你的曾曾祖父或者没有干过任何事和你的现状相冲突，你才能在时间中回到过去。此外，当你回到过去，你不能改变记载的历史。那表明你并没有自由意志为所欲为。当然，人们可以说，自由意志反正是虚幻的。如果确实存在一套制约万物的完整的统一理论，它也应该决定你的行动。但是对于像人这么复杂的机体，其制约和决定方式是不可能计算出来的。我们之所以说人们具有意志，乃在于我们不能预言他或她的未来行动。然而，如果一个人乘火箭飞船出发并在这之前已经回返，我们就将能预言其未来行为，因为那将是记载的历史的一部分。这样，在这种情形下，时间旅行者没有自由意志。

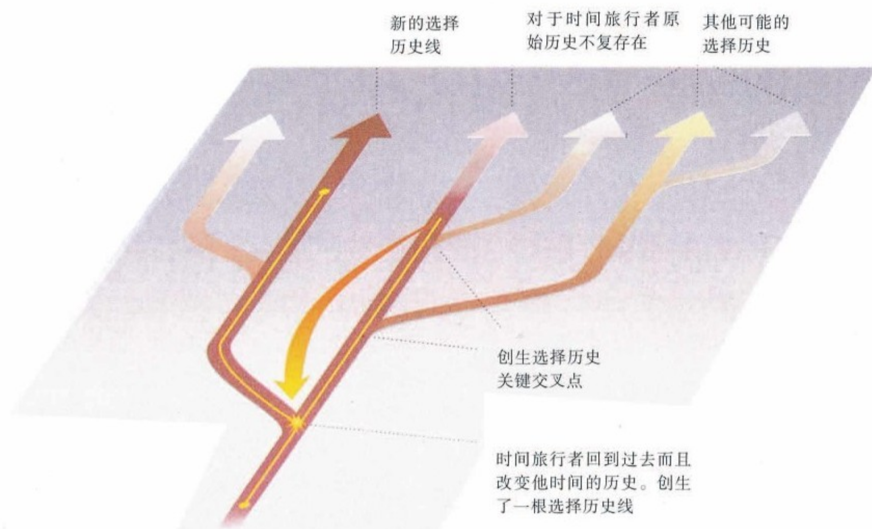


图10.9　解决时间旅行佯谬的一种方法是假定存在选择历史整个系列，它们在某些关键事件处相互分叉。

解决时间旅行的其他可能的方法可称为选择历史假说。其思想是，当时间旅行者回到过去，他就进入和记载的历史不同的另外历史中去（图10.9）。这样，他们可以自由地行动，不受和原先的历史相一致的约束。史蒂芬·斯匹柏十分喜爱影片《回归未来》中的创意：玛提·马克弗莱能够回到过去，而且把他双亲恋爱的历史改得更令人满意。

听起来，选择历史假说和理查德·费恩曼把量子理论表达成历史求和的方法相类似，这已在第四章和第八章描述过。这是说宇宙不仅仅有一个单独历史，它有所有可能的历史，每一个历史都有自己的概率。然而，在费恩曼的设想和选择历史之间似乎存在一个重要的差别。在费恩曼求和中，每一个历史都是由完整的时空和其中的每一件东西组成的。时空可以被卷曲成可能乘火箭旅行到过去。但是火箭要留在同一时空即同一历史中，因而历史必须是协调的。这样，费恩曼的历史求和设想似乎支持协调历史假说，而不支持选择历史假说。

费恩曼历史求和确实允许在微观的尺度下旅行到过去。我们在第九章看到，科学定律在CPT联合作用下不变。这表明，一个在反时钟方向自旋并从A运动到B的反粒子还可以被认为是在时钟方向自旋并从B运动回A的通常粒子。类似地，一个在时间中向前运动的通常粒子等价于在时间中往后运动的反粒子。正如在本章以及第七章讨论过的，“空虚

的”空间充满了虚的粒子和反粒子对，它们一道出现、分离，然后回到一块并且相互湮灭。

这样，人们可以把这对粒子认为是在时空中沿着一个闭合圈环运动的单独粒子（图10.10）。当对子在时间中向前运动时（从它出现的事件出发到达它湮灭的事件），它被称为粒子。但是，当粒子在时间中往回运动时（从对湮灭的事件出发到达它出现的事件），可以说成反粒子在时间中向前运动。



图10.10　一个反粒子可被认为是一个往时间过去运动的粒子。所以虚粒子/反粒子对可以被认为是一个粒子在时空的闭合圈环中运动。

在解释黑洞如何发射粒子并辐射（见第七章）时认为，虚的粒子/反粒子对中的一个成员（譬如反粒子）会落到黑洞中去，另一个失去和它湮灭的伙伴的成员留了下来。这个被抛弃的粒子也可以落入黑洞，但是它也可以从黑洞的邻近挣脱。如果这样的话，对于一位远处的观察者，它就作为从黑洞发射出的粒子而出现。

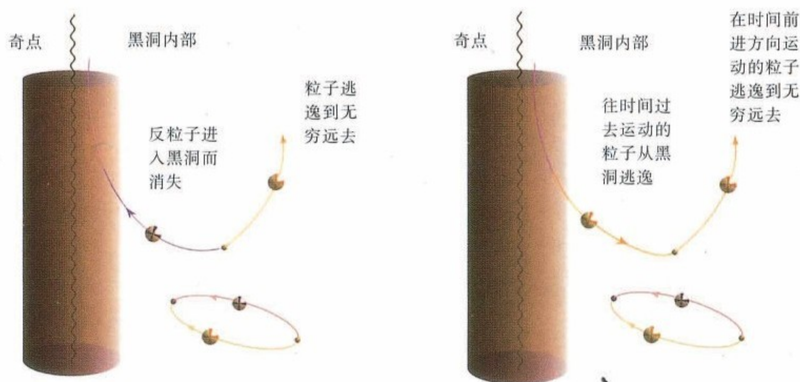


图10.11　两种黑洞辐射的等效图景在左边，虚对中的反粒子落入黑洞，留下的粒子自由地逃逸。在右边，一个反粒子落进黑洞被认为是粒子往时间的过去运动并从黑洞逃逸。

然而，人们对于黑洞辐射的机制可有不同的却是等价的图象。人们可以把虚对中的那个落入黑洞的成员（譬如反粒子）看成从黑洞出来的在时间中往回运动的粒子。当它到达虚粒子反粒子对一道出现的那一点，它被引力场散射成从黑洞逃脱的在时间中向前运动的粒子（图10.11）。相反，如果虚对中的粒子成员落入黑洞，人们也可以把它认为是从黑洞出来的在时间中往回运动的反粒子。这样，黑洞辐射表明，量子理论在微观尺度上允许在时间中的往回运动，而且这种时间旅行能产生可观测的效应。

因此产生这样的问题：量子理论在宏观尺度上允许时间旅行吗？这是人们能够利用的。初看起来，它应该是能够的。费恩曼历史求和的设想是指对所有的历史进行的。这样，它应包括被卷曲成允许旅行到过去的时空。那么，为什么我们并没有受到历史的骚扰？例如，假定有人回到过去，并把原子弹秘密提供给纳粹？

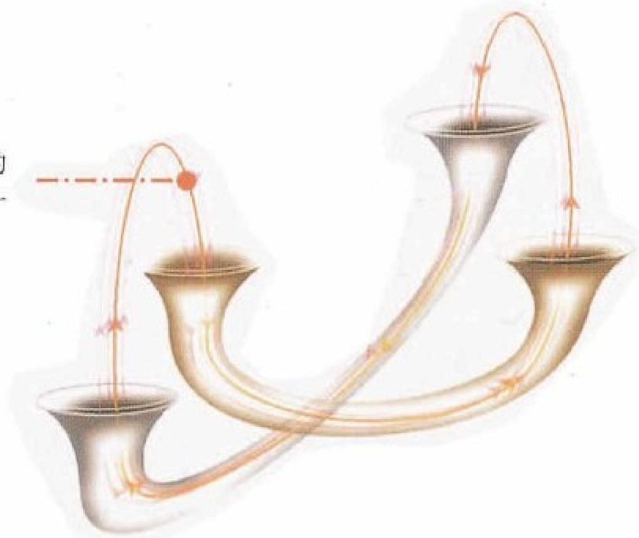
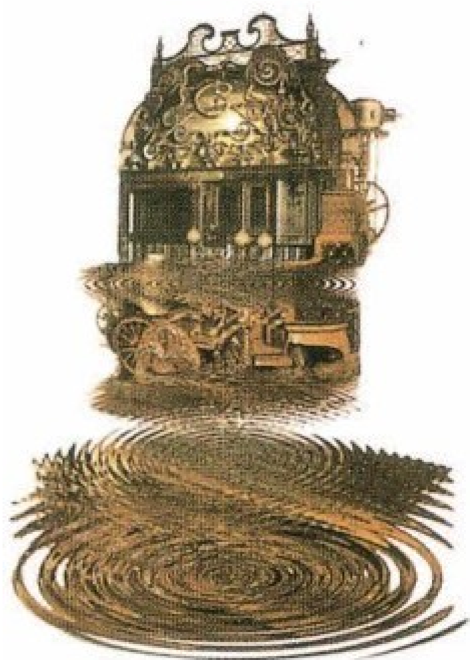


图10.12　在允许时间旅行的时空中，虚粒子可能成为实的：它们会多次通过时空同一点并使能量密度变得非常大。

如果我称作时序防卫猜测成立的话，这些问题便可以避免。它是讲，物理学定律共谋防止宏观物体将信息传递到过去。它正如宇宙监督猜测一样，还未被证明，但是有理由相信它是成立的。

相信时序防卫有效的原因是，当时空被卷曲得可以旅行到过去时，在时空中的闭合圈环上运动的虚粒子，能够变成在时间前进的方向上以等于或者低于光速的速度运动的实粒子。由于这些粒子可以任意多次地围绕着圈环运动，它们通过路途中的每一点许多次（图10.12）。这样，它们的能量被再三地计入，使能量密度变得非常大。这也许赋予时空以正的曲率，因而不允许旅行到过去。这些粒子会引起正的还是负的曲率，或者由某种虚粒子产生的曲率是否被别种粒子产生的抵消，仍然不清楚。这样，时间旅行的可能性仍然未决。但是我不准备为之打赌，我的对手或许具有通晓未来的不公平的优势。



第十一章　物理学的统一

正如在第一章中所解释的，一蹴而就地建立一个包括宇宙中万物的完备统一理论是非常困难的。取而代之，我们在寻求描述有限范围事件的部分理论上取得了进步，这时我们忽略了其他效应，或者将它们用一定的数字来近似表示（例如，化学允许我们计算原子间的相互作用时，可以不管原子核内部的结构）。然而，最终人们希望找到一个完备的协调的，将所有这些部分理论当做它的近似的统一理论。在这理论中不需要为某些任意数选值去符合事实。寻找这样的一个理论被称之为“物理学的统一”。爱因斯坦用他晚年的大部分时间寻求一个统一理论，但是没有成功。因为尽管已有了引力和电磁力的部分理论，但关于核力还知道得非常少，所以时机还没成熟。并且，尽管他本人对量子力学的发展起过重要的作用，但他拒绝相信它的真实性。但是，不确定性原理似乎还是我们生活其中的宇宙的一个基本特征。因此，一个成功的统一理论必须将这个原理结合进去。

正如我将描述的，由于我们对宇宙知道得这么多，现在找到这样的一个理论的前景似乎是好得多了。但是我们必须小心，不要过分自信——我们在过去有过对成功的错误的期望！例如，在本世纪初，曾经以为任何东西都可以按照诸如弹性和热传导之类的连续物质的性质予以解释。原子结构和不确定性原理的发现使之彻底破产。然后又有一次，1928年物理学家诺贝尔奖获得者马克斯·玻恩告诉一群来格丁根大学的访问者：“据我们所知，物理学将在6个月之内结束。”他的信心是基于狄拉克新近发现的能够制约电子的方程。人们认为质子——这个当时仅知的另一种粒子——服从类似的方程，并且那将会是理论物理的终结。然而，中子和核力的发现对此又是当头一棒。尽管讲到这些，仍然有理由谨慎地乐观，我们现在也许已经接近探索自然终极定律的尾声。

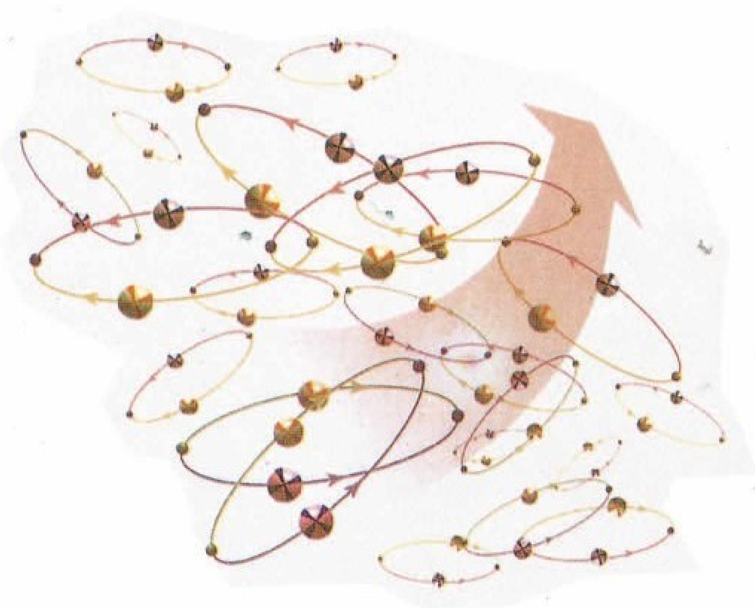


图11.1　虚粒子反粒子对甚至赋予空的空间以无限的能量密度并且把它弯曲成无穷小。这一无限能量必须被减除或对消。

在前几章中，我描述了引力的部分理论即广义相对论和制约弱力、强力和电磁力的部分理论。这后三种理论可以合并成为所谓的大统一理论（GUT）。这个理论并不令人非常满意，因为它没有包括引力，并且因为包含不能从理论预言，而必须人为选择以和观测符合的一些量，譬如不同粒子的相对质量，等等。要找到一个将引力和其他力统一的理论，主要困难在于广义相对论是一个“经典”理论；也就是说，它没有将量子力学的不确定性原理结合进去。另一方面，其他的部分理论却以非常基本的形式依赖于量子力学。因此，第一步必须将广义相对论和量子力学结合在一起。正如我们已经看到的，这能产生一些显著的推论，例如黑洞不是黑的，宇宙没有任何奇点，是完全自足的并且没有边界。正如第七章解释的，麻烦在于，不确定性原理意味着甚至“空虚的”空间也充满了虚的粒子和反粒子对，这些粒子对似应具有无限的能量，并且由爱因斯坦的著名方程$E=mc^2$得知，这些粒子似应具有无限的质量。这样，它们的引力的吸引就会将宇宙卷曲到无限小的尺度（图11.1）。

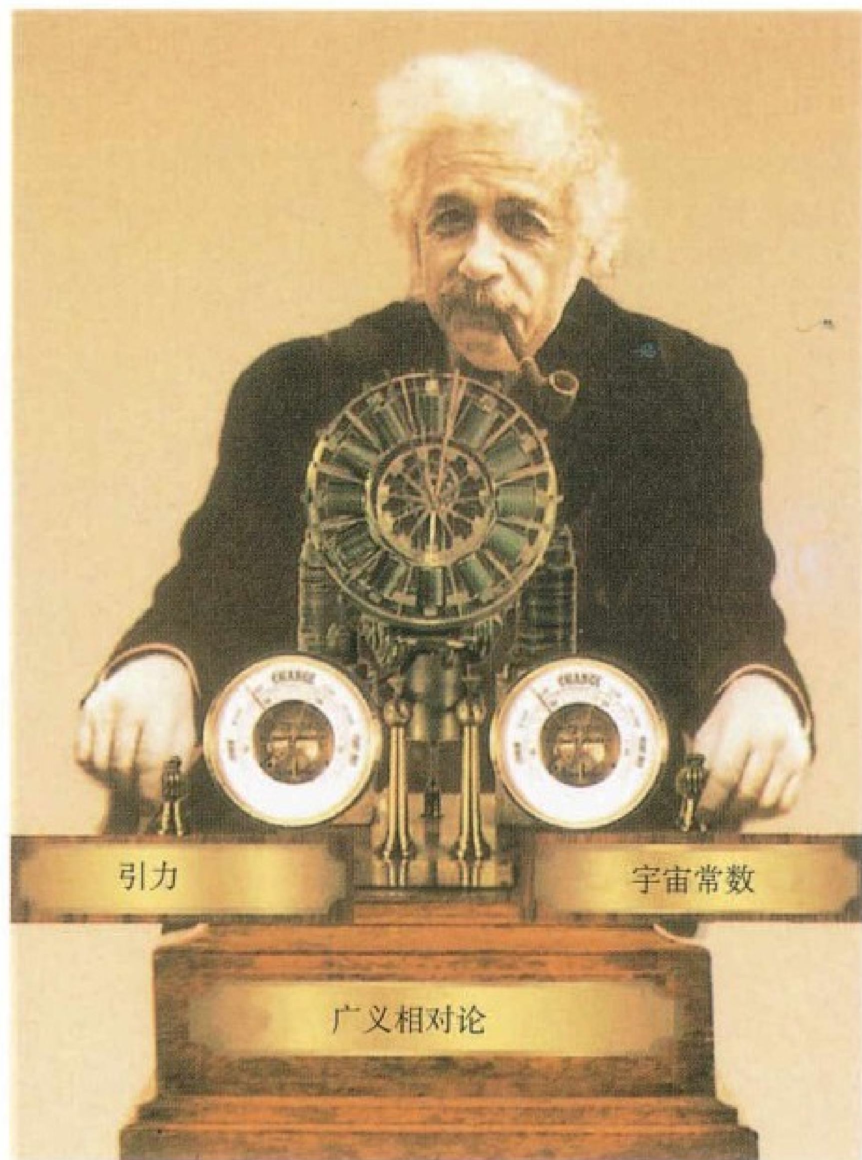


图11.2　人们在广义相对论中只能调整引力强度和宇宙常数。这两个调整不足以取消所有的无限大。

相当类似地，在其他部分理论中也发生似乎荒谬的无限大。但是，所有这些情形下的无限大都可用称作重正化的过程消除掉。这牵涉到引入其他的无限大去消除这些无限大。虽然这个技巧在数学上颇令人怀疑，而在实际上似乎确实行得通，并用来和这些理论一起作出预言，这些预言极其精确地和观测一致。然而，从企图找到一个完备理论的观点看，由于不能从理论中预言，而相反地为了适合观测，必须选择质量和

力的强度的实际值，因此重正化确实具有一个严重的缺陷。

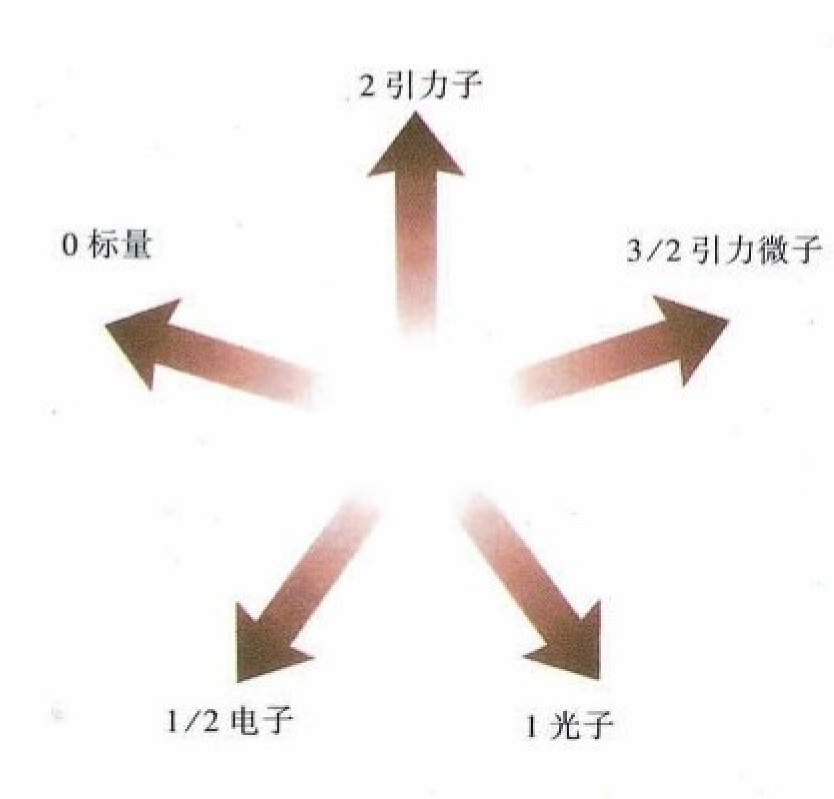


图11.3　在超引力中，不同自旋的粒子可认为是一个单独超粒子的不同方面。

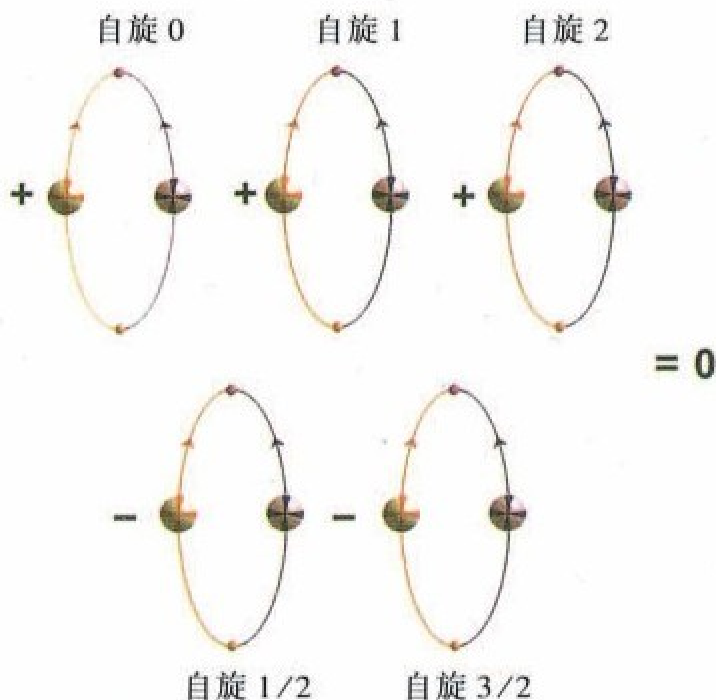


图11.4　自旋1/2和3/2的虚对的能量是负的，并把自旋0，1和2的对的正能量抵消，这就排除了大多数的无限大。

在试图将不确定性原理结合到广义相对论时，人们只有两个可以调整的量：引力强度和宇宙常数的值。但是调整它们不足以消除所有的无限大（图11.2）。因此，人们得到一个理论，它似乎预言了诸如时空的曲率的某些量真的无限大，但是观察和测量表明它们地地道道是有限的！人们对这个结合广义相对论和不确定性原理的问题怀疑了许久，直到1972年才被仔细的计算最后确证。4年之后，人们提出了一种叫做“超引力”的可能的解答。它的思想是将携带引力的自旋为2称为引力子的粒子和某些其他具有自旋为3/2、1、1/2和0的新粒子结合在一起。在某种意义上，所有这些粒子可认为是同一“超粒子”的不同侧面。这样就将自旋为1/2和3/2的物质粒子和自旋为0、1和2的携带力的粒子统一起来了（图11.3）。自旋1/2和3/2的虚的粒子反粒子对具有负能量，因此抵消了自旋为2、1和0的虚的粒子对的正能量。这就使得许多可能的无限大被抵消掉（图11.4），但是人们怀疑，可能仍然保留了某些无限大。人们需要找出是否还遗存下未被抵消的无限大。然而，这计算是如此之冗长和困难，以至于没人准备着手去进行。即使使用一个计算机，预料至

少要用4年功夫，而且犯至少一个或更多错误的机会是非常大的。这样，只有其他人重复计算，并得到同样的答案，人们才能判断已取得了正确的答案，但这似乎是不太可能的！



图11.5

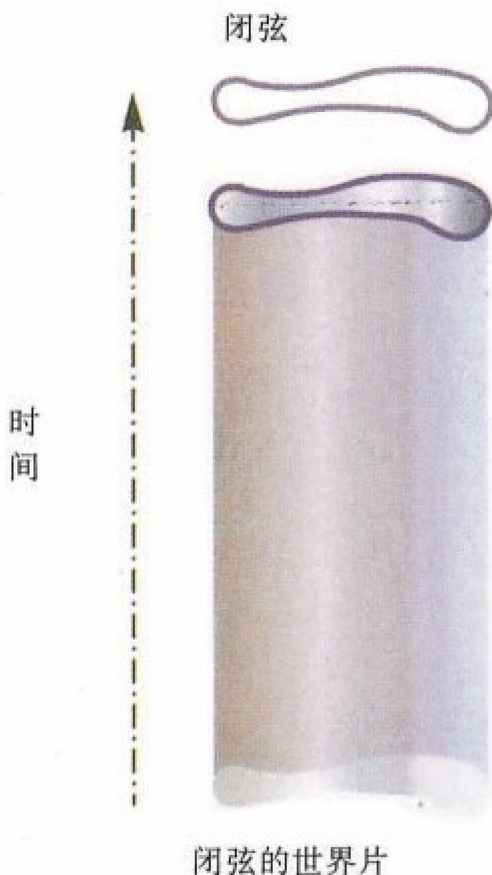


图11.6

尽管这些问题，尽管超引力理论中的粒子似乎与观察到的粒子不相符合的这一事实，大多数科学家仍然相信，超引力可能是对于物理学统一问题的正确答案。看来它是将引力和其他力相统一起来的最好办法。然而，1984年人们的看法发生了显著的改变，他们更喜欢所谓的弦理论。在这些理论中，基本的对象不再是只占空间单独的点的粒子，而是只有长度而没有其他维，像是一根无限细的弦这样的东西。这些弦可以有端点（所谓的开弦），或它们可以自身首尾相接成闭合的圈子（闭弦）。一个粒子在每一时刻占据空间的一点。这样，它的历史可以在时空中用一根线代表（“世界线”）。另一方面，一根弦在每一时刻占据空间的一根线。这样它在时空里的历史是一个叫做世界片的二维面。（在这世界片上的任一点都可用两个数来描述：一个指明时间，另一个指明这一点在弦上的位置。）一根开弦的世界片是一条带子：它的边缘代表

弦的端点通过时空的路径（图11.5）。一根闭弦的世界片是一个圆柱或一个管（图11.6）：一个管的截面是一个圈，它代表在一特定时刻的弦的位置。



图11.7



图11.8

两根弦可以连接在一起，形成一根单独的弦；在开弦的情形下只要将它们的端点连在一起即可（图11.7）。在闭弦的情形下，像是两条裤腿合并成一条裤子（图11.8）。类似地，一根单独的弦可以分成两根弦。在弦理论中，原先以为是粒子的东西，现在被描绘成在弦里旅行的波动，如同振动着的风筝的弦上的波动。一个粒子从另一个粒子发射出来或者被吸收，对应于弦的分解和合并。例如，太阳作用到地球上的引力，在粒子理论中被描述成由太阳上的粒子发射出并被地球上的粒子吸收的引力子（图11.9）。在弦理论中，这个过程对应于一个H形状的管（图11.10）（在某种方面，弦理论有点像管道工程）。H的两个垂直的边对应于太阳和地球上的粒子，而水平的横杠对应于在它们之间旅行的

引力子。

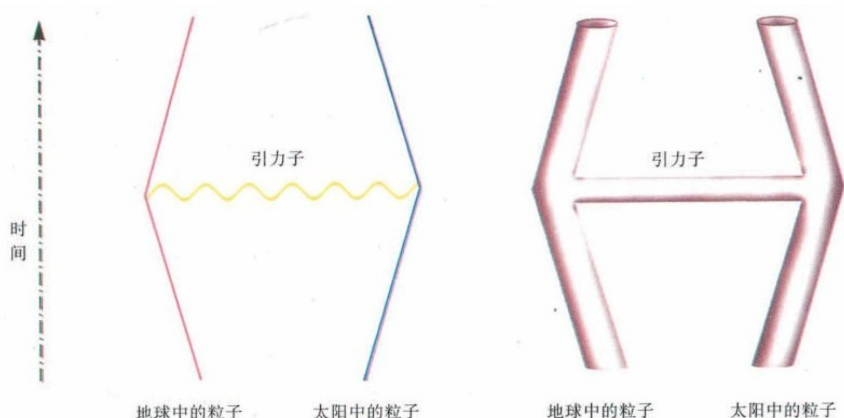


图11.9和图11.10　在粒子理论中，长程力被描绘成由交换一个携带力的粒子引起的，但是在弦理论中它们被认为是由连接的管引起的。

弦理论有一个古怪的历史。它原先是60年代后期被发明出来，以试图找到描述强力的理论。其思想是，诸如质子和中子这样的粒子可被认为是一根弦上的波动。这些粒子之间的强力对应于连接其他一些弦之间的弦的片段，正如在蜘蛛网中一样。这弦必须像具有大约10吨拉力的橡皮带，才能使这理论给出粒子之间强力的观察值。

1974年，巴黎的朱勒·谢尔克和加州理工学院的约翰·施瓦兹发表了一篇论文，指出弦理论可以描述引力，只不过其张力要大得多，大约是1000万亿亿亿亿吨（1后面跟39个0）。在通常尺度下，弦理论和广义相对论的预言是相同的，但在非常小的尺度下，比十亿亿亿亿分之一厘米（1厘米被1后面跟33个0除）更小时，它们就不一样了。然而，他们的工作并没有引起很大的注意，因为大约正是那时候，大多数人抛弃了原先的强作用力的弦理论，而倾心于基于夸克和胶子的理论，后者似乎和观测符合得更好。谢尔克死得很惨（他受糖尿病折磨，在周围没人给他注射胰岛素时昏迷死去）。这样一来，施瓦兹几乎成为弦理论的唯一支持者，只不过现在设想的弦张力要大得多而已。

1984年，由于两个明显的原因，人们对弦理论的兴趣突然复活。一个原因是，在证明超引力是有限的以及解释我们观察到的粒子的种类方面，人们未能真正取得进展。另一个原因是，约翰·施瓦兹和伦敦玛丽皇后学院的迈克·格林发表的一篇论文指出，弦理论可以解释内禀的左手征性的粒子存在，正如我们观察到的一些粒子那样。不管什么原因，大量

的人很快开始作弦理论的研究，而且发展了称之为杂化弦的新形式，这种形式似乎能够解释我们观测到的粒子类型。

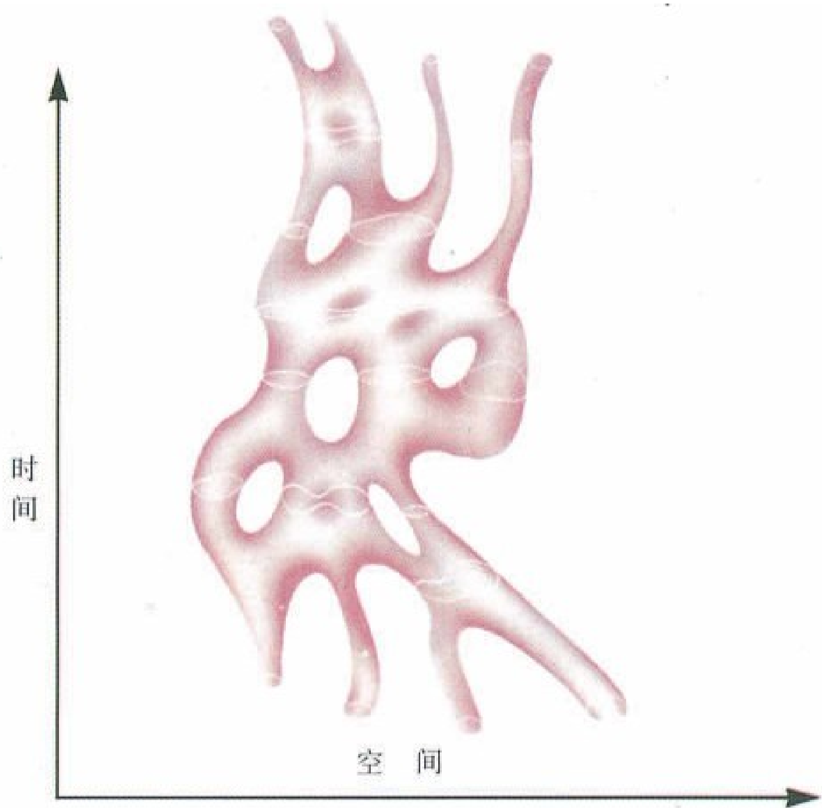


图11.11　在时空中闭弦组合并且形成片。如果把所有基本粒子都当做弦来处理，就可能找到一种协调的量子理论，它可以解释所有四种基本力。

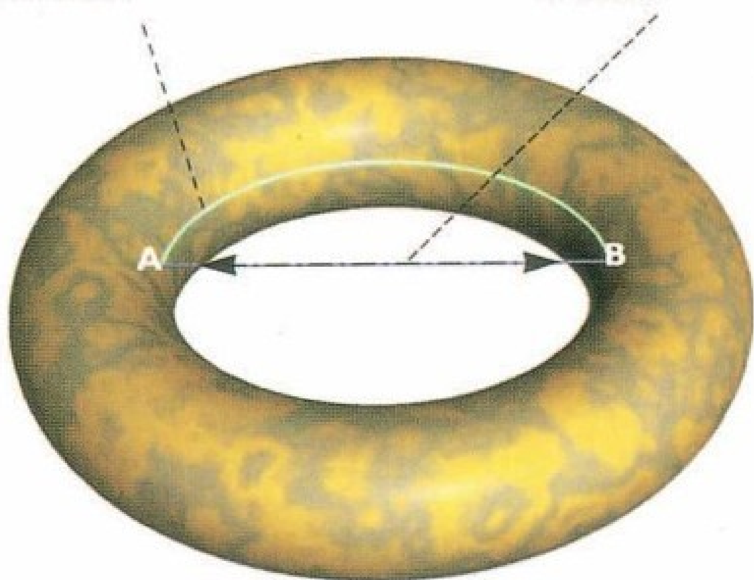


图11.12

弦理论也导致无限大，但是人们认为，它们在一些像杂化弦的形式中会被消除掉（虽然这一点还没被确认）。然而，弦理论有更大的问题：似乎时空是十维或二十六维，而不是通常的四维时它们才是协调的！当然，额外的时空维的确是科学幻想的老生常谈；它们提供了克服广义相对论的通常限制的理想方法，即人们不能行进得比光更快或者旅行到过去的限制（见第十章）。其思想是穿过更高的维抄近路。你可用以下方法描绘这一点。想象我们生活的空间只有二维，并且弯曲成像一个锚圈或环的表面（图11.12）。如果你处在这环的内侧的一边，而要跨过环到另一侧的一点去，你必须沿着环的内边缘上的圆圈走，直到目标点。然而，你如果允许在第三维空间里旅行，你可以直接穿过去。

如果这些额外的维确实存在，为什么我们全然没有觉察到它们呢？为何我们只看到三个空间维和一个时间维呢？人们的看法是，其他的维被弯卷到非常小的尺度——大约为一百万亿亿亿分之一英寸的空间，人们根本无从觉察这么小的尺度：我们只能看到一个时间维和三个空间维，在这些维中时空是相当平坦的。这正如一根麦秸的表面。如果你近看它，就会发现它是二维的（要用两个数来描述麦秸上的点，一个是沿

着麦秸的长度，另一个是围绕着圆周方向的距离）。但是，当你远看它时，你分辨不出它的粗细（图11.13），而它就显得是一维的（只用沿麦秸的长度来指明点的位置）。对于时空亦是如此：在非常小的尺度下，时空是十维的，并且是高度弯曲的，但是在更大的尺度下，你看不见曲率或者额外的维。如果这个图象是正确的，对于自愿的空间旅行者来讲可是个坏消息：额外的维实在是太小了，根本不允许航天飞船通过。然而，它引起了另一个重要问题。为何一些而非所有的维都被卷曲成一个小球？也许在宇宙的极早期，所有的维都曾经非常弯曲过。为何一维时间和三维空间被摊平开来，而其他维仍然紧紧地卷曲着？

人存原理可能提供一个答案。二维空间似乎不足以允许像我们这样复杂生命的发展。例如，在一维地球上生活的二维动物，为了相互通过，就必须一个爬到另一个之上。如果二维动物吃东西时不能将之完全消化，则它必须将其残渣从吞下食物的同样通道吐出来，因为如果有一个穿通全身的通道，它就将这生物分割成两个分开的部分：我们的二维动物就解体了（图11.14）。类似地，在二维动物身上实现任何血液循环都是非常困难的。

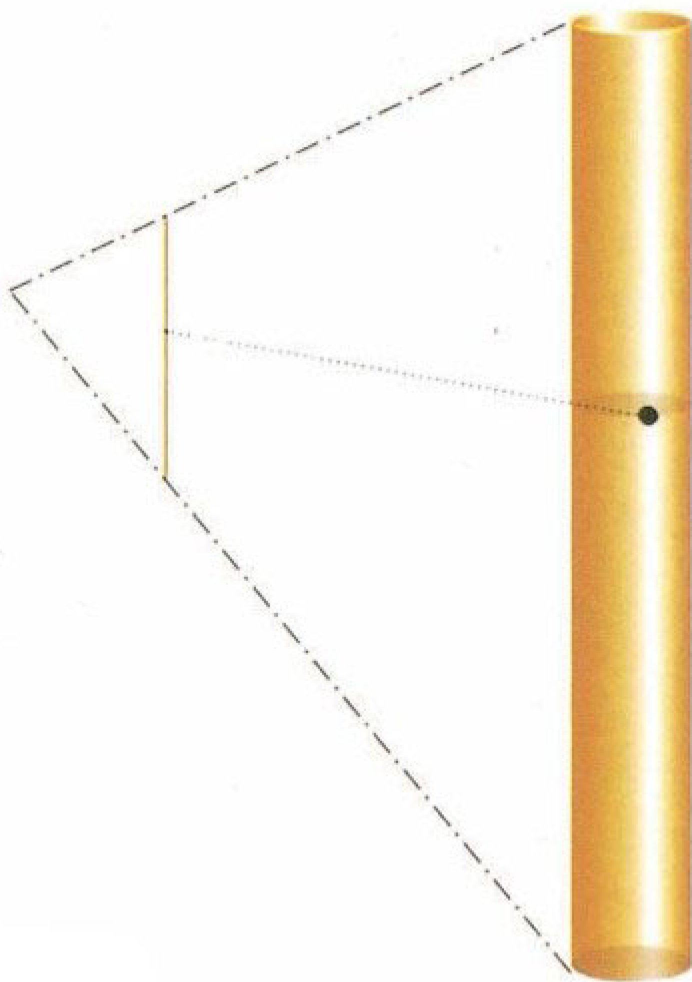


图11.13　一根麦秸近看像是二维的圆柱，但是它在远处看像是一维的线。



图11.14　具有消化道的二维动物会被分解成两部分。

多于三个空间维也有问题。两个物体之间的引力将随距离衰减得比在三维空间中更快（在三维空间内，如果距离加倍，则引力减少到四分之一。在四维空间减少到八分之一，在五维空间减少到十六分之一，等等）。其意义在于使像地球这样围绕着太阳的行星的轨道变得不稳定：地球偏离圆周轨道的最小微扰（例如由于其他行星的引力吸引）都会使它以螺旋线的轨道向外离开或向内落到太阳上去。我们就会被冻死或者被烧死。事实上，在维数多于三维的空间中，引力随距离变化的同样行为意味着，太阳不可能存在于压力和引力相平衡的稳定的状态下，它要么被四分五裂，要么坍缩形成一个黑洞。在任一种情况下，对地球上的生命来说，它作为热和光的来源，都没有多大用处。在小尺度下，原子里使电子围绕着原子核运动的电力行为正和引力一样。这样，电子要么全部从原子逃逸出去，要么沿螺旋的轨道落到原子核上去。在任一种情形下，都不存在我们知道的原子。

看来很清楚，至少如我们所知，生命只能存在于一维时间和三维空间没被卷曲得很小的时空区域里。这表明，只要人们可以证明弦理论至少允许宇宙存在这样的区域——似乎弦理论确实能做到这一点，则我们可以求助弱人存原理。同样，也会存在宇宙的其他区域或其他宇宙（不

管那是什么含意），那里所有的维都被卷曲得很小，或者多于四维几乎是平坦的，但是在这样的区域里，不会有智慧生物去观察这不同数目的有效维数。

另一个问题是至少存在四种不同的弦理论（开弦和三种不同的闭弦理论），以及由弦理论预言的额外维的极其繁多的卷曲方式。为何自然只挑选一种弦理论和一种卷曲方式？这问题一度似乎没有答案，因而无法向前进展！后来，大约从1994年开始，人们开始发现所谓的对偶性：不同的弦理论以及额外维的不同卷曲方式会导致四维时空中的同样结果。不仅如此，正如在空间中占据单独一点的粒子，也像空间中线状的弦，还存在另外称作p膜的东西，它在空间中占据二维或更高维的体积。（粒子可认为是0膜，而弦为1膜，但是还存在p从2到9的p膜。）这似乎表明，在超引力、弦以及p膜理论中存在某种民主：它们似乎和平相处，没有一种比另一种更基本。看起来，它们是对某种基本理论的不同近似，这些近似在不同的情形下成立。

人们探索了这个基本理论，但是迄今毫无成就。正如哥德尔指出，不可能用单独的一族公理系统来表述算术。我相信这里的情形不可能比它更好，基本理论不可能存在单独的表述。相反，它也许和地图类似：你不可能只用一张单独的地图去描述地球或者锚圈的表面：在地球的情形下，你至少需要两张地图去覆盖每一点，而在锚圈的情形下，则需要四张。每张地图只对一个有限的区域有效，但是不同的地图有一个交叠的区域。整族地图就为该表面提供了完整的描述（图11.15）。类似地，在物理学中对不同的情形需要使用不同的表述，但是两种不同表述在它们都适用的情形下要相互一致。整族不同的表述可以被认为是完备的统一理论，尽管它不是依照单独的假设集合表达的理论。







图11.15　从数学的观点看，地球的表面不能只用一幅地图将其覆盖——人们至少需要两幅部分相重叠的地图。类似地，人们也许不可能为理论物理提供单一的基本表述，在不同情形下必须使用不同的表述。

但是，确实存在一个这样的统一理论吗？或者我们也许仅仅是在追求海市蜃楼。似乎存在三种可能性：

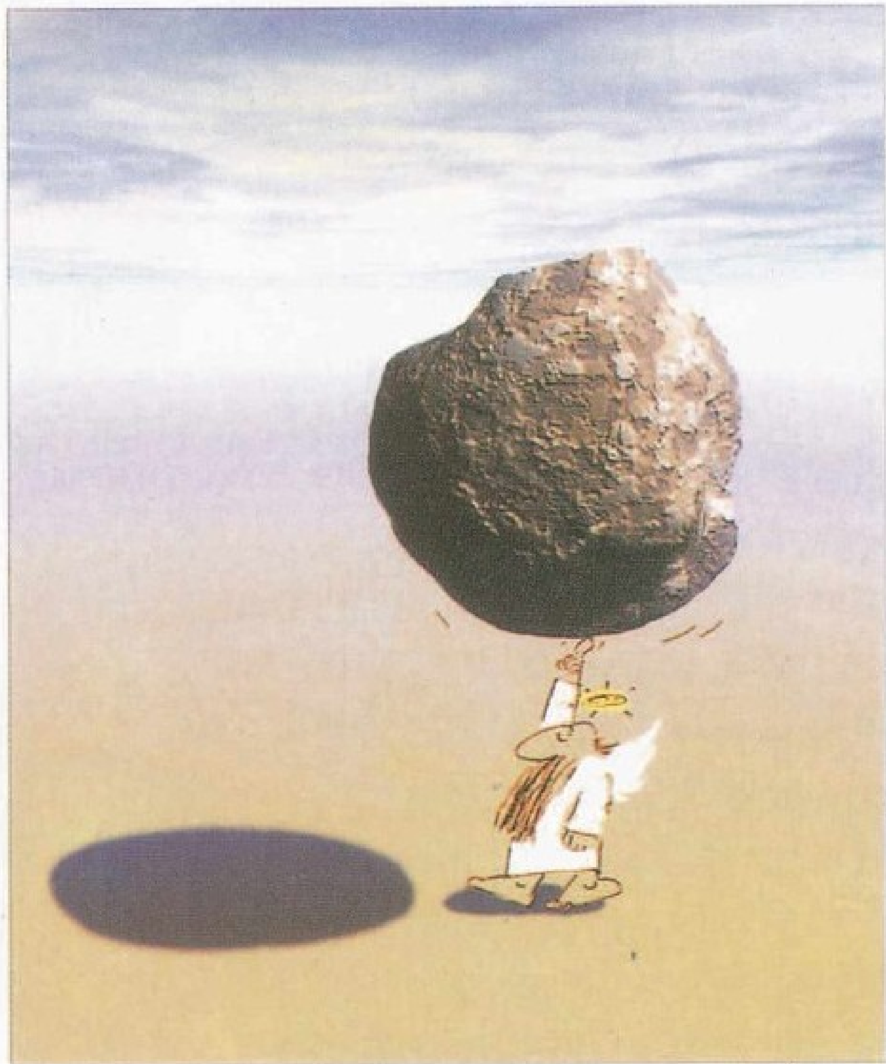
（1）确实存在一个完备的统一理论（或者一族交叠的表述），如果我们足够聪明的话，总有一天会找到它。

（2）并不存在宇宙的最终理论，仅仅存在一个越来越精确地描述宇宙的无限的理论序列。

（3）并不存在宇宙的理论：不可能在一定程度之外预言事件，事件仅以一种随机或任意的方式发生。

有些人基于以下理由赞同第三种可能，如果存在一族完备的定律，这将侵犯上帝改变其主意并对世界进行干涉的自由。这有点像那古老的二律背反：上帝能制造一个重到连自己都不能将其举起的石块吗？但是上帝可能要改变主意的这一思想，正如圣·奥古斯丁指出的，是一个想象上帝存在在时间里的虚妄的例子：时间只是上帝创造的宇宙的一个性质。可以设想，当他创造宇宙时，他就知道了自己所有的企图！

随着量子力学的发现，我们认识到，由于总存在一定程度的不确定性，因此，不可能完全精确地预言事件。如果有人愿意，他可以将此随意性归结为上帝的干涉。但这会是一种非常奇怪的干涉：没有任何证据表明它具有任何目的。的确，如果它有目的，则按定义就不是随意的。现代由于我们重新定义科学的目标，所以已经有效地排除了上述的第三种可能性：我们的目的只在于表述一族定律，这些定律能使我们在不确定性原理的极限之内预言事件。



上帝能制造一个重到连自己都不能将其举起的石块吗？

第二种可能性，也就是存在一无限的越来越精确的理论序列，是和迄今为止我们的经验相符合的。在许多场合我们增加了测量的灵敏度，或者进行了新的类型的观测，只是为了发现还没被现有理论预言的新现象，为了解释这些，我们必须发展更高级的理论。这一代的大统一理论预言：在大约100吉电子伏的弱电统一能量和大约1000万亿吉电子伏的大统一能量之间，没有什么本质上新的现象发生。因此，如果这个预言是错的话，人们并不会感到非常惊讶。我们的确可以预期发现一些新的比夸克和电子——这些我们目前以为是“基本”粒子一更基本的结构层次。

然而，引力似乎可以为这个“盒子套盒子”的序列设下极限。如果人们有一个具有比1000亿亿吉电子伏（1后面跟19个0）的所谓普朗克能量更高能量的粒子，它的质量就会集中到如此的程度，它就会脱离宇宙的其他部分，而形成一个小黑洞。这样看来，当我们往越来越高的能量去的时候，越来越精密的理论序列确实应当有某一极限，所以必须有宇宙的终极理论（图11.16）。当然，普朗克能量离开大约一百吉电子伏——目前在实验室中所能产生的最大的能量——非常远，我们不可能在可见的未来用粒子加速器填补其间的差距！然而，宇宙的极早期阶段是这样大的能量必定发生的舞台。我以为，早期宇宙的研究和数学协调性的要求，很有可能会导致当今我们周围的某些人在有生之年获得一个完备的统一理论。当然，这一切都是假定我们首先不使自身毁灭的前提下而言的。

如果我们确实发现了宇宙的终极理论，这意味着什么？正如在第一章中解释的，因为理论不能被证明，我们将永远不能肯定，我们是否确实找到了正确的理论。但是如果理论在数学上是协调的，并且总是给出与观察一致的预言，我们便可以适度地相信它是正确的。它将给人类理解宇宙的智力斗争长期而光辉的历史篇章打上一个休止符。但是，它还会变革常人对制约宇宙定律的理解。在牛顿时代，一个受教育的人至少可能在梗概上掌握整个人类知识。但从那以后，科学发展的节奏使之不再可能。因为理论总是被改变以解释新的观察结果，它们从未被消化或简化到使常人能够理解。你必须是一个专家，即使如此，你只能有望正确地掌握科学理论的一小部分。另外，其发展的速度如此之快，在中学和大学所学的总是有点过时。只有少数人可以跟得上知识快速进步的前沿，但他们必须贡献毕生的精力，并局限在一个小的领域里。其余的人对于正在进行的发展或者它们产生的激动只有很少的概念。70年前，如果爱丁顿的话是真的，那么只有两个人理解广义相对论。今天，成千上万的大学研究生能理解，并且几百万人至少熟悉这个思想。如果发现了一套完备的统一理论，以同样方法将其消化并简化，以及在学校里至少讲授其梗概，这只是时间的迟早问题。我们那时就都能够对制约宇宙，并对我们的存在负责的定律有所理解。



图11.16　对越来越小尺度的观测导致直至量子色动力学（QCD）的在越来越高能量下成立的物理理论序列，甚至可能还要超过直至大统一理论（GUT）。然而，普朗克能量可以提供一个切断，并且暗示存在一个终极理论。

即使我们发现了一个完备的统一理论，由于两个原因，这并不表明我们能够一般地预言事件。第一是量子力学不确定性原理给我们的预言能力设立的限制。对此我们无法克服。然而，在实际上更为严厉的是第二个限制。它是由以下事实引起的，除了非常简单的情形，我们不能准确解出这理论的方程。（在牛顿引力论中，我们甚至连三体运动问题都不能准确地解出，而且随着物体的数目和理论复杂性的增加，困难愈来愈大。）除了在最极端条件下之外，我们已经知道规范物体在所有条件下的行为的定律。特别是，我们已经知道作为所有化学和生物基础的基本定律。我们肯定还没有将这些学科归结为可解问题的状态：到现在为止，我们在根据数学方程来预言人类行为上只取得了很少的成功！所以，即使我们确实找到了基本定律的完备集合，在未来的岁月里，我们仍面临着在智慧上挑战性的任务，那就是发展更好的近似方法，使得在复杂而现实的情形下，能作出对可能结果的有用预言。一个完备的协调的统一理论只是第一步：我们的目标是完全理解发生在我们周围的事件

以及我们自身的存在。

第十二章　结论

我们发现自己处于令人困惑的世界中。我们要理解周围所看到的一切的含义，并且寻问：宇宙的本质是什么？我们在其中的位置如何，以及宇宙和我们从何而来？宇宙为何是这个样子？

我们试图采用某种世界图来回答这些问题。如同一个无限的乌龟塔背负平坦的地球是这样的图象一样，超弦理论也是一种图象。虽然后者比前者更数学化，更准确得多，但两者都是宇宙的理论。两个理论都缺乏观测的证据：没人看到一个背负地球的巨龟，但也没有人看到超弦。然而，龟理论作为一个好的科学理论是不够格的，因为它预言了人会从世界的边缘掉下去。除非可以用它释人们在百慕大三角消失的传说，否则这个理论和经验不一致！

最早在理论上描述和解释宇宙的企图牵涉到这样一种思想：具备人类情感的灵魂控制着事件和自然现象，它们的行为和人类非常相像，并且是不可预言的。这些灵魂栖息在自然物体，诸如河流、山岳以及包括太阳和月亮这样的天体之中。我们必须向它们祈祷并供奉，以保证土壤肥沃和四季循环。然而，我们逐渐注意到一些规律：太阳总是东升西落，而不管我们是否用牺牲向太阳神供奉。此外，太阳、月亮和行星沿着可事先被预言得相当准确的轨道穿越天穹。太阳和月亮仍然可以是神祇，只不过是服从严格定律的神祇。如果你不将为约书亚停止太阳运行之类的神话信以为真，则这一切显然是毫无例外的。


龟宇宙


德谟克里特原子


平坦地球模型


托勒密体系


哥白尼体系


卢瑟福原子


尼尔斯·玻尔原子

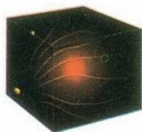

强人存模型


弗里德曼闭合宇宙


膨胀气球理论


黑洞理论


无边界设想


历史求和模型


弦理论


虫洞模型

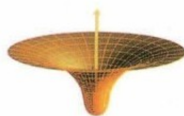
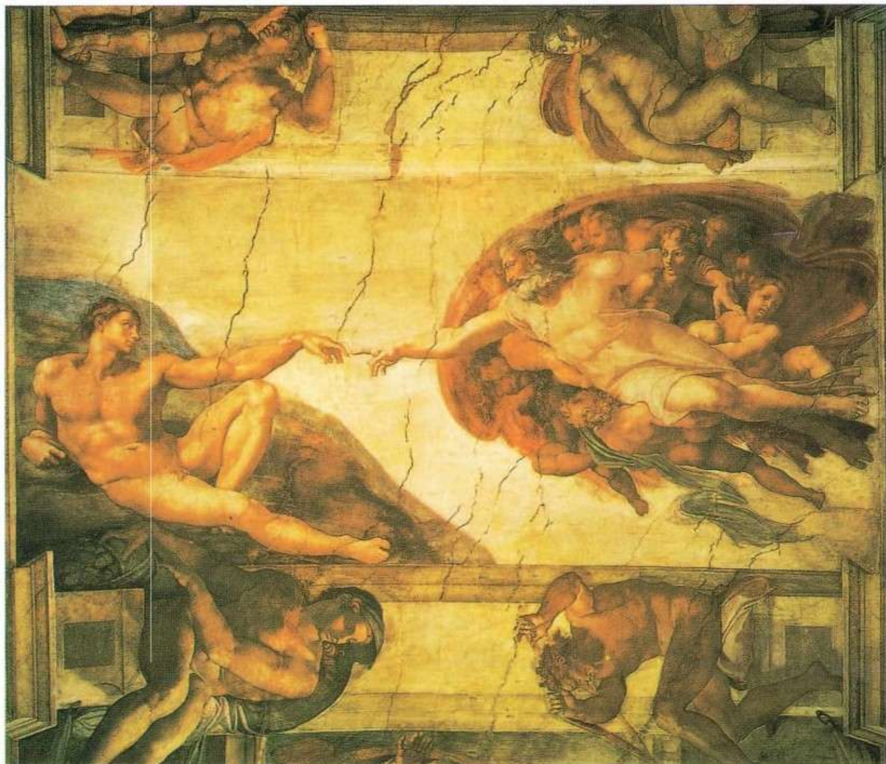

暴胀宇宙

图12.1　本书提到的一些试图解释宇宙的理论模型。



米盖朗琪罗作《亚当之创生》。拉普拉斯理论认为，上帝选择宇宙启始的方式和宇宙将服从的定律，但此后祂不再干涉。

最初，只有在天文学和其他一些情形下，这些规律和定律才是显而易见的。然而，随着文明的发展，特别是近300年间，越来越多的规律和定律得到发现。这些定律的成功，使得拉普拉斯在19世纪初提出科学的决定论；也就是他提议的，有一族定律存在，只要给定宇宙在某一时刻的状态，这些定律就能精确决定宇宙的演化。

拉普拉斯的决定论在两个方面是不完整的：它没讲应该如何选择定律，也没指定宇宙的初始状态。这些都留给了上帝。上帝会选择让宇宙如何开始并要服从什么定律，但是一旦开始之后，他将不再干涉宇宙。事实上，上帝被局限于19世纪科学不能理解的领域里。

我们现在知道，拉普拉斯对决定论的希望，至少按照他所想的方式，是不能实现的。量子力学的不确定性原理意味着，某些成对的量，比如粒子的位置和速度，不能同时被完全精确地预言。量子力学通过一类量子理论来处理这种情形，在这些理论中粒子没有精确定义的位置和速度，而是由一个波来代表。这些量子理论给出了波随时间演化的定

律，在这种意义上，它们是宿命的。于是，如果我们知道某一时刻的波，我们便可以将它在任一时刻推算出。只是当我们试图按照粒子的位置和速度对波做解释的时候，不可预见性的随机的要素才出现。但这也许是我们的错误：也许不存在粒子的位置和速度，只有波。只不过是我们企图将波硬套到我们关于位置和速度的先入为主的观念之上而已。由此导致的不协调乃是表面上不可预见性的原因。

事实上，我们已经将科学的任务重新定义为，发现能使我们在由不确定性原理设定的界限内预言事件的定律。然而，还存在如下问题：如何或者为何选取宇宙的定律和初始状态？

我在本书中特地突出制约引力的定律，因为正是引力使宇宙的大尺度结构成形，即使它是四类力中最弱的一种。引力定律和直到相当近代还为人深信的宇宙在时间中不变的观念不相协调：引力总是吸引，这一事实意味着，宇宙的演化方式两者必居其一，要么正在膨胀，要么正在收缩。按照广义相对论，宇宙在过去某一时刻肯定有一个具有无限密度的状态，亦即大爆炸，这是时间的有效起始。类似地，如果整个宇宙坍缩，在将来必有另一个无限密度的状态，亦即大挤压，这是时间的终结。即使整个宇宙不坍缩，在任何坍缩形成黑洞的局部区域里都会有奇点。这些奇点正是任何落进黑洞的人的时间终点。在大爆炸时和其他奇点，所有定律都失效，所以上帝仍然有完全的自由去选择发生了什么以及宇宙如何开始。

当我们将量子力学和广义相对论结合，似乎产生了前所未有的新的可能性：空间和时间一起可以形成一个有限的四维的没有奇点或边界的空间，这正如地球的表面，但具有更多的维。看来这种思想能够解释宇宙间已观察到的许多特征，诸如它的大尺度一致性，还有包括星系、恒星甚至人类等在小尺度上对此均匀性的偏离。但是，如果宇宙是完全自足的，没有奇点或边界，并且由统一理论完全描述，那么就对上帝作为造物主的作用有深远的含义。

有一次爱因斯坦问道："在建造宇宙时上帝有多少选择性？"如果无边界假设是正确的，上帝就根本没有选择初始条件的自由。当然，上帝仍有选择宇宙所服从的定律的自由。然而，这也许实在并没有那么多选择性；很可能只有一个或数目很少的完备的统一理论，例如弦论，它们是自洽的，并且允许像人类那样复杂结构的存在，这些结构能够研究宇宙定律并询问上帝的本性。

即使只有一种可能的统一理论，那也只不过是一组规则和方程而已。是什么赋予这些方程以活力去制造一个为它们所描述的宇宙呢？通常的科学方法，即建立一个数学模型，不能回答为什么会有一个为此模型所描述的宇宙这个问题。为什么宇宙要找这么多存在的麻烦？难道统一理论如此咄咄逼人，以至于其自身之实现不可避免？或者它需要一个造物主，若是这样，他对宇宙还有其他效应吗？又是谁创造了他？

迄今为止，大部分科学家太忙于发展描述宇宙为何物的理论，以至于没工夫过问为什么。另一方面，以寻根究底为己任的哲学家跟不上科学理论的进步。在18世纪，哲学家把包括科学在内的整个人类知识当做他们的领域，并讨论诸如宇宙有无开端的问题。然而，在19世纪和20世纪，对哲学家或除了少数专家以外的任何人来说，科学变得过于专业性和数学化了。哲学家把他们的质疑范围缩小到如此程度，以至于连维特根斯坦，这位20世纪最著名的哲学家都说道："哲学余下的任务仅是语言分析。"这是从亚里士多德到康德哲学的伟大传统的何等堕落啊！

如果我们确实发现了一个完备的理论，在主要的原理方面，它应该及时让所有人理解，而不仅仅让几个科学家理解。那时我们所有人，包括哲学家、科学家以及普普通通的人，都能参与讨论我们和宇宙为什么存在的问题。如果我们对此找到了答案，则将是人类理性的终极胜利——因为那时我们知道了上帝的精神。



阿尔伯特·爱因斯坦

爱因斯坦与核弹政治的瓜葛是众所周知的：他签署了那封著名的致富兰克林·罗斯福总统的信，说服美国认真考虑他的想法，并且他在战后致力于阻止核战争的爆发。但是，这些不仅仅是一位科学家被拖入政界的孤立行动。事实上，用爱因斯坦自己的话来说，他的一生“一半用于政治，一半用于方程”。

爱因斯坦最早从事政治活动是在第一次世界大战期间，当时他在柏林当教授。由于目睹草菅人命而不胜厌恶，他卷入了反战示威。他拥护非暴力反抗以及公开鼓励人民拒绝服兵役，因而不受他的同事们欢迎。后来，在战时，他又致力于调解和改善国际关系。这也使他不受欢迎，而且他的政治态度很快使他难以访问美国，甚至连讲学都有困难。

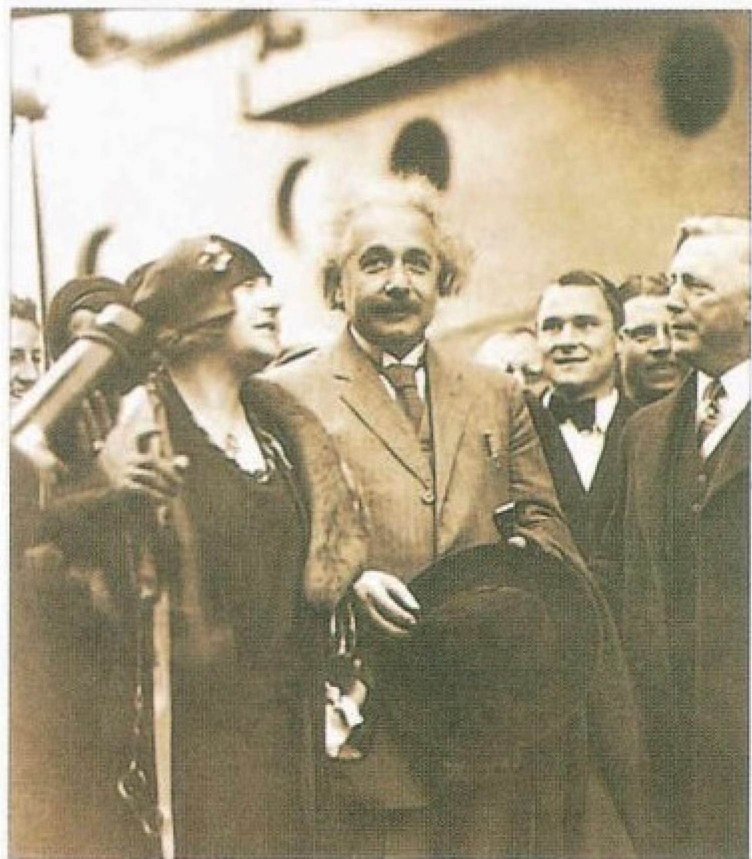


阿尔伯特·爱因斯坦（1879～1955）。这张照片是在世纪之交拍摄的。

爱因斯坦第二个伟大的事业是犹太复国主义。虽然他在血统上是犹太人，但他拒绝接受《圣经》上关于上帝的说法。然而，在第一次世界大战之前和期间，他越发看清反犹主义，这导致他逐渐认同犹太团体，而后成为一个直言不讳的犹太复国主义的拥护者。再度不受欢迎也未能阻止他发表自己的主张。他的理论开始受到攻击，甚至有人成立了一个反爱因斯坦的组织。有一个人因教唆他人去谋杀爱因斯坦而被定罪（却只罚了6美元）。但爱因斯坦是冷静的。当一本题为《100个反爱因斯坦

的作家》的书出版时，他反驳道："如果真是我错了的话，有一个人反对我就足够了！"

1933年，希特勒上台了。爱因斯坦正在美国，他宣布不再回德国。后来纳粹冲锋队查抄了他的房子，并没收了他的银行存款。一家柏林报纸的头条写道："来自爱因斯坦的好消息——他不回来了。"面对着纳粹的威胁，爱因斯坦放弃了和平主义，由于担心德国科学家会制造核弹，他终于建议美国应该发展自己的核弹。但是，甚至在第一枚原子弹爆炸之前，他就曾经公开警告过核战争的危险，并提议对核武器进行国际控制。



1930年新年前夕爱因斯坦和他的妻子埃尔莎访问加利福尼亚的圣地亚哥。3年之后他永久离开德国

终其一生，爱因斯坦致力于和平的努力可能成效甚微——肯定不受欢迎。然而，1952年他得到担任以色列总统的提议，他对犹太复国主义

事业的畅言无忌的支持得到了充分的承认。但他谢绝了。他说他认为自己在政治上过于天真。可是，也许他真正的理由却并非如此，再次引用他自己的话："方程对我而言更重要些，因为政治是为当前，而方程却是永恒的东西。"

伽利略·伽利雷

伽利略可能比任何其他人更有资格称为近代科学的奠基人。他与天主教会名闻遐迩的冲突对他的哲学是极重要的，因为伽利略是最早作出如下论断的人之一：人类有望理解世界如何行为，而且我们能通过观察现实世界来做到这一点。伽利略很早就相信哥白尼理论（即行星绕太阳公转），但只有当他发现了支持这一观念的证据后，才公开支持。他用意大利文写有关哥白尼理论的文章（没有用通常的学院式拉丁文），并且他的观点很快就广泛地传播到大学之外。这惹怒了亚里士多德派的教授们，他们联合起来反对他，并极力说服天主教会禁止哥白尼主义。



伽利略使用的望远镜，其放大率为30倍。

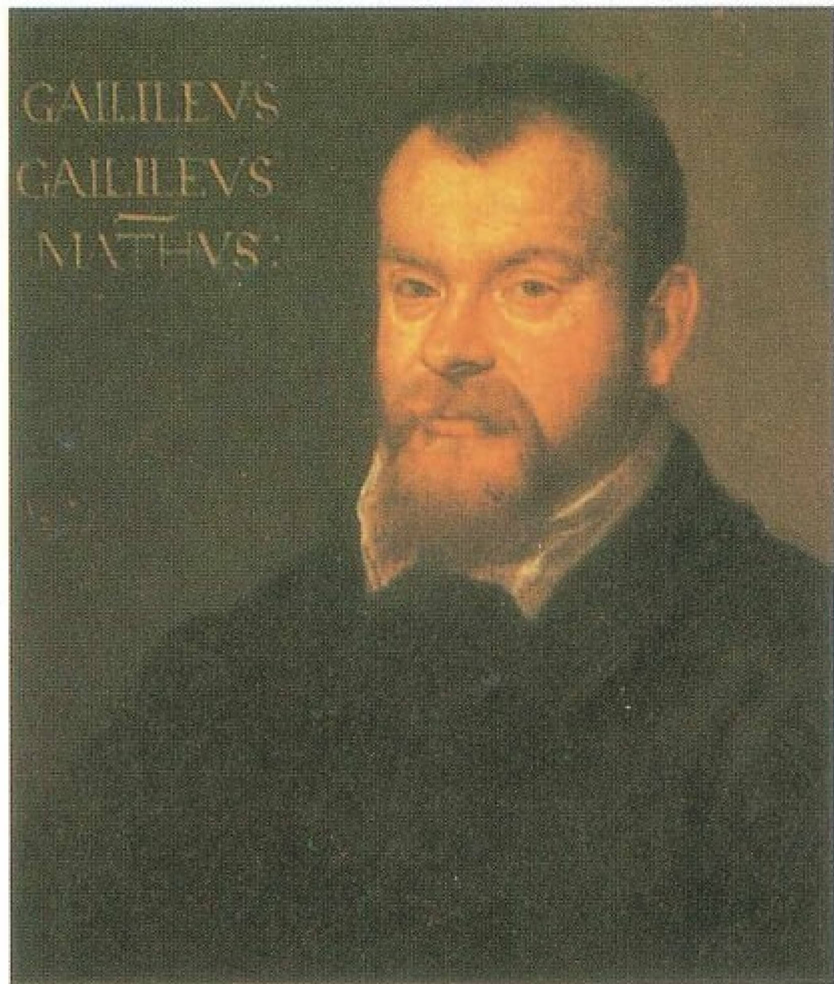
伽利略为此担心，他赶到罗马去向天主教会当局当面申诉。他争辩道，《圣经》并不试图告诉我们任何科学理论，而且通常都假定，在《圣经》和常识发生矛盾的地方，《圣经》是以讽喻的方式叙述的：

但是教会害怕这样的丑闻可能削弱它对新教的斗争，所以采取了镇压的手段。1616年，天主教会宣布哥白尼主义是“虚假的和错误的”，并命令伽利略再也不准“保卫或坚持”这一学说。伽利略勉强接受了。

1623年，伽利略的一位老友成为教皇，伽利略立即试图为1616年的判决翻案，他失败了，但他设法获得了准许，在两个前提下写一本讨论亚里士多德和哥白尼理论的书：他不能有倾向，同时要得出结论，无论如何人不能确定世界是如何运行的，因为上帝会以人难以想象的方式来达到同样的效果，而人类不能限制上帝的万能。

这本题为《关于两大世界体系的对话》的书，于1632年在审查官的全力支持下完成并出版了——并且立刻被全欧洲欢呼为文学和哲学的杰作。不久教皇就意识到，人们把这本书视为拥护哥白尼主义的令人信服的论证，后悔允许该书出版。教皇指出，虽有审查官正式批准出版该书，但伽利略依然违背了1616年的禁令。他把伽利略带到宗教法庭，宣布对他终身软禁，并命令他公开放弃哥白尼主义。伽利略第二次被迫服从。

伽利略仍然是一个忠实的天主教徒，但是他对科学独立的信仰从未动摇过。1642年，即他逝世前4年，当时他仍然被软禁着，他第二本主要著作的手稿被偷运给一个荷兰的出版商。正是这本被称为《两种新科学》的书，甚至比支持哥白尼更进一步，成为现代物理学的发端。



伽利略·伽利雷（1564-1642）。



伽利略发表于1610年的《星空信使》一书展示了由他的望远镜揭示的许多星体

艾萨克·牛顿

艾萨克·牛顿是一个不讨人喜欢的人。他和其他院士的关系声名狼藉。他在激烈的争吵中度过晚年的大部分时间。随着那部肯定是物理学有史以来最有影响的书——《自然哲学的数学原理》的出版，牛顿很快就成为名重一时的人物。他被任命为皇家学会主席，并成为第一个被授予爵位的科学家。

不久，牛顿就与皇家天文学家约翰·夫莱姆斯梯德发生冲突。他起初曾为牛顿《自然哲学的数学原理》一书提供急需的数据，但是他后来却扣压了牛顿需要的资料。牛顿是不许别人回答“不”字的，他自封为皇家天文台的大总管，然后强迫立即公布这些数据。最后，他指使夫莱姆斯梯德的冤家对头爱德蒙·哈雷夺取夫莱姆斯梯德的工作成果，并且准备出版。可是夫莱斯梯德告到法庭去，在最紧要关头赢得了法庭的判决——不得发行这部剽窃的著作。牛顿被激怒了，作为报复，他在《自然哲学的数学原理》后来的版本中系统地删除了所有来自夫莱姆斯梯德的引证。

他和德国哲学家哥特夫瑞德·莱布尼茨之间发生了更严重的争论。莱布尼茨和牛顿各自独立地发展了称作微积分的数学分支，它是大部分近代物理的基础。虽然现在我们知道，牛顿发现微积分要比莱布尼茨早若干年，可是他比莱布尼茨晚很久才出版他的著作。于是发生了关于谁是第一个发现者的大争吵，科学家们激烈地为双方做辩护。然而值得注意的是，大多数为牛顿辩护的文章均出自牛顿本人之手，虽然是以他朋友的名义出版！当争论日趋激烈时，莱布尼茨犯了向皇家学会起诉来解决争端的错误。牛顿作为其主席，指定一个清一色的由牛顿的朋友组成的“公正的”委员会来审查此案！更有甚者，牛顿后来自己写了一个委员会报告，并让皇家学会将其出版，正式地谴责莱布尼茨的剽窃行为。即便如此，牛顿心犹未足，他又在皇家学会的杂志上写了一篇匿名的、关于该报告的回顾。据报道，莱布尼茨死后，牛顿扬言他为“伤透了莱布尼茨的心”而洋洋得意。



艾萨克·牛顿（1642-1727），凡德班克绘制。

在这两次争吵期间，牛顿已经离开剑桥和学术界。在剑桥他曾积极从事反天主教政治，后来在议会中也很活跃。最终，作为酬报，他得到皇家造币厂厂长的肥差。在这里，他以社会上更能接受的方式，施展他那狡猾和刻薄的能耐，成功地导演了一场反对伪币的重大战役，甚至将几个人送上了绞刑架。

小辞典

绝对零度：所能达到的最低温度，在此温度下物体没有热能。

加速度：物体速度改变的速率。

人存原理：我们之所以看到宇宙是这个样子，是因为如果它不是这样的话，我们就不会在这里去观察它。

反粒子：每个类型的物质粒子都有相对应的反粒子。当一个粒子和它的反粒子碰撞时，两者就湮灭，只留下能量。

原子：通常物质的基本单元，是由很小的核子（包括质子和中子）以及围着它转动的电子构成。

大爆炸：宇宙开端的奇点。

大挤压：宇宙终结的奇点。

黑洞：时空的一个区域，因为那里的引力是如此之强，以至于任何东西，甚至光都不能从该处逃逸出来。

卡西米尔效应：在真空中两片平行的平坦金属板之间的吸引压力。这种压力是由平板之间的空间中的虚粒子的数目比正常数目减小而引起的。

昌德拉塞卡极限：一个稳定的冷星的可能的最大质量的临界值。比这质量更大的恒星，则会坍缩成一个黑洞。

能量守恒：关于能量（或它的等效质量）既不能产生也不能消灭的科学定律。

坐标：指定时空中一点的位置的一组数。

宇宙常数：爱因斯坦使用的一个数学手段，它赋予时空一个嵌入的膨胀向。

宇宙学：对整个宇宙的研究。

暗物质：在星系、星系团以及可能在星系团之间的物质，这种物质不能直接被观测到，但是可以由它的引力效应被检测到，宇宙中的质量多达90%可能处于暗物质的形式。

对偶性：导致相同的物理结果的，表面上不同的理论之间的对应。

爱因斯坦-罗森桥：连接两个黑洞的时空的细管还请参见虫洞。

电荷：粒子的一个性质，由于这性质粒子排斥（或吸引）其他带有相同（或相反）符号电荷的粒子。

电磁力：在带电荷的粒子之间引起的力；它是四种基本力中第二强的力。

电子：带有负电荷并围绕着原子核转动的粒子。

弱电统一能量：大约为100吉电子伏的能量，在比这能量更大时，电磁力和弱力之间的差别消失。

基本粒子：被认为不可再分的粒子。

事件：由它的时间和位置所指明的在时空中的点。

事件视界：黑洞的边界。

不相容原理：两个相同的自旋为二分之一的粒子（在不确定性原理设定的极限之内）不能同时具有相同的位置和速度。

场：某种充满空间和时间的东西，与它相反的是在一个时刻只在一点存在的粒子。

频率：对一个波而言，在1秒内完整循环的次数。

伽马射线：波长非常短的电磁射线，是由放射性衰变或由基本粒子碰撞产生的。

广义相对论：爱因斯坦基于如下思想的理论，即科学定律对所有的观察者，不管他们如何运动，都必须是相同的它将引力解释成四维时空的曲率。

测地线：两点之间最短（或最长）的路径。

大统一能量：人们相信，在比这个能量更大时，电磁力、弱力和强力之间的差别消失。

大统一理论（GUT）：一种统一电磁力、强力和弱力的理论。

虚时间：用虚数测量的时间。

光锥：时空中的面，在上面标出光通过一给定事件的可能方向。

光秒（光年）：光在1秒（1年）的时间里走过的距离。

磁场：引起磁力的场，现在和电场合并成电磁场。

质量：物体中物质的量；它的惯性或对加速的抵抗。

微波背景辐射：起源于炽热的早期宇宙的灼热的辐射，现在它受到如此大的红移，以至于不以光而以微波（波长为几厘米的射电波）的形式呈现出来。

裸奇点：不被黑洞围绕的时空奇点。

中微子：只受弱力和引力影响的极轻的粒子。

中子：一种和质子非常类似的但不带电荷的粒子，在大多数原子的核中大约一半的粒子是中子。

中子星：在超新星爆发后，有时一个恒星中心的物质的核坍缩成一团密集的中子，这种余下的冷的恒星称作中子星。

无边界条件：宇宙是有限的但是没有边界的思想。

核聚变：两个核碰撞并合并形成单独的更重的核的过程。

核：原子的中心部分，只由质子和中子构成。在核中强作用力将质子和中子束缚在一起。

粒子加速器：一种利用电磁铁能够对运动的带电粒子加速，给它们更多能量的机器。

相位：对一个波，特定的时刻在它循环中的位置：一种它是否在波峰、波谷或它们之间的某点的标度。

光子：光的一个量子。

普朗克量子原理：光（或任何其他经典的波）只能被发射或吸收分立的量子，其能量与它们的频率成正比，和它们的波长成反比的思想。

正电子：电子的（带正电荷的）反粒子。

太初黑洞：在极早期宇宙中产生的黑洞。

比例："x正比于Y"，表示当Y被乘以任何数时，X也如此；"X反比于Y"，表示当Y被乘以任何数时，X被那个数除。

质子：一种和中子非常类似的但带正电荷的粒子，在大多数原子的核中大约一半的粒子是质子。

脉冲星：发射出无线电波规则脉冲的旋转中子星。

量子：波可被发射或吸收的不可分的单位。

量子色动力学（QCD）：描述夸克和胶子相互作用的理论。

量子力学：从普朗克量子原理和海森伯不确定性原理发展而来的理论。

夸克：感受强作用力的（带电的）基本粒子。每一个质子和中子都由3个夸克组成。

雷达：利用脉冲射电波的单独脉冲到达目标并折回的时间间隔来测量对象位置的系统。

放射性：一种类型的原子核自动分裂成其他类型的原子核。

红移：由于多普勒效应，从离开我们而去的恒星发出的光线的红化。

奇点：时空中的一点，在该处时空曲率（或者一些其他的物理量）变得无限大。

奇点定理：这定理是说，在一定情形下奇点必须存在——特别是宇宙必须起始于一个奇点。

时空：四维的空间，上面的点是事件。

空间维：三维中的任何一维——也就是除了时间维外的任何一维。

狭义相对论：爱因斯坦的基于如下思想的理论，即科学定律在没有引力现象时，对所有进行自由运动的观察者，无论他们的运动速度如何，都必须相同。

谱：构成一个波的分频率。太阳谱的可见光部分可以在彩虹中看见。

自旋：相关于但不等同于日常的自转概念的基本粒子的内部性质-

稳态：不随时间变化的态：一个以固定速率自转的球是稳定的，因为即便它不是静止的，在任何时刻它看起来都是等同的。

弦论：物理学的理论，在该理论中粒子被描述成弦上的波。弦具有长度，但没有其他维。

强力：4种基本力中最强的，作用距离最短的一种力。它在质子和中子中将夸克束缚在一起，并将质子和中子束缚在一起形成原子核。

不确定性原理：海森伯表述的一个原理，该原理说，人们永远不能够精确地同时知道粒子的位置和速度；对其中的一个知道得越精确，则对另外一个就知道得越不精确。

虚粒子：在量子力学中，一种永远不能直接检测到的，但其存在确实具有可测量效应的粒子。

波/粒二象性：量子力学中的概念，认为在波和粒子之间没有区别；粒子有时可以像波一样行为，而波有时可以像粒子一样行为。

波长：在一个波中，两个相邻波谷或波峰之间的距离。

弱力：4种基本力中仅次于引力的第二弱的，作用距离非常短的一种力。它作用于所有物质粒子，而不作用于携带力的粒子。

重量：引力场作用在物体上的力。它和质量成比例，但又不同于质量。

白矮星：一种由电子之间不相容原理排斥力所支持的稳定的冷的恒星。

虫洞：联结宇宙的遥远区域的时空细管。虫洞还可以联结到平行或婴儿宇宙，并且能够提供时间旅行的可能性。

感谢

我在撰写本书时得到多人相助。我的科学同仁毫无例外地激发我的灵感。在漫长的岁月里，我主要的合作者为罗杰·彭罗斯、罗伯特·格罗许、布兰登·卡特、乔治·埃里斯、盖瑞·吉朋斯、唐·佩奇和詹姆·哈特尔。他们有求必应，我非常感激他们，同时也非常感激我的学生们。

我的一名学生布里安·维特在准备初版时提供了许多帮助。矮脚鸡图书公司的编辑彼德·古查底还给我写下无数评语，使本书改善甚多。此外，对于这部插图版书，我还想感谢为我配插图的飞月设计公司的人们，以及安德鲁·杜恩，他为我修改正文并且配上插图说明。我觉得他们做得非常好。

如果没有眼前的这台交流系统，本书就写不成。这套称作平衡器的软件是加利福尼亚兰卡斯特文字处理公司的瓦特·沃尔托兹捐赠的。我的语言合成器是加利福尼亚太阳谷的语音处理公司捐赠的。剑桥适用通讯公司的大卫·梅森把合成器和手提电脑安装在我的轮椅之上。利用这个系统交流，我现在比我失声之前能更好地与人交谈了。

在我著作和修改此书的年代里，有过许多秘书和助手。对于秘书们，我应特别感谢的有茱迪·费拉、安·拉弗、劳拉·珍翠、谢瑞尔·比林顿和苏·梅西。我的助手为柯灵·威廉斯、大卫·托马斯、雷蒙·拉夫勒蒙、尼克·菲利普、安德鲁·杜恩、斯图瓦·詹米森、约纳逊·布连奇利、提蒙·汉特、赛蒙·基尔、琼·罗杰斯和汤姆·肯达尔。尽管我是残废的，但是他们、我的护士、合作者、朋友以及家人们使我的生命非常充实并能进行研究。

史蒂芬·霍金

STEPHEN

HAWKING

With Leonard Mlodinow

时间简史

[普及版]



A BRIEFER HISTORY OF TIME

史蒂芬·霍金　列纳德·蒙洛迪诺 / 著　吴忠超 / 译

湖南科学技术出版社

图书在版编目（CIP）数据

时间简史（普及版）/（英）霍金等著；吴忠超译.
长沙：湖南科学技术出版社，2005.12
ISBN 978-7-5357-4451-7
I. ①时… II. ①霍… ②吴… III. ①宇宙学 - 普及读物 IV.P159-49

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第150515号

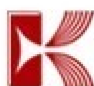
A BRIEFER HISTORY OF TIME by Stephen Hawking & Leonard Mlodinow
(Copyright notice exactly as in Proprietor's edition)
Simplified Chinese translation copyright © 2011 by Hunan Science & Technology Press
Published by arrangement with Writers House,LLC
ALL RIGHTS RESERVED

湖南科学技术出版社获得本书中文简体版中国内地独家出版发行权。
版权登记号：18-2007-087

时间简史（普及版）

著者：史蒂芬·霍金 列纳德·蒙洛迪诺
译者：吴忠超
策划编辑：孙桂均 李媛
文字编辑：陈一心
出版发行：湖南科学技术出版社
社址：长沙市湘雅路276号
http://www.hnstp.com
邮购联系：本社直销科 0731-84375808
印刷：湖南新华印刷集团有限责任公司（长沙）
（印装质量问题请直接与本厂联系）
厂址：湖南望城·湖南出版科技园
邮编：410219

出版日期：2015年7月第1版第19次
开本：635mm×970mm 1/16
印张：9.5
字数：200 000
书号：ISBN 978-7-5357-4451-7
定价：48.00元
（版权所有·翻印必究）


湖南科学技术出版社
HUNAN SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS

目录

版权信息
·译者序·
·前言·
·第1章· 思索宇宙
·第2章· 宇宙演化的图像
·第3章· 科学理论的本性
·第4章· 牛顿之宇宙
·第5章· 相对论
·第6章· 弯曲空间
·第7章· 膨胀的宇宙
·第8章· 大爆炸、黑洞和宇宙的演化
·第9章· 量子引力
·第10章· 虫洞和时间旅行
·第11章· 自然的力和物理学统一
·第12章· 结论
·阿尔伯特·爱因斯坦·
·伽利略·伽利雷·
·艾萨克·牛顿·
·小辞典·
·致谢·



·译者序·

2002年8月史蒂芬·霍金第二次访华。在告别杭州飞赴北京之际，他委托我将他的第三本书译成中文，这就是读者手中的这本《时间简史（普及版）》。

直到2004年5月，我才收到他和列纳德·蒙洛迪诺的电子稿件。这比他在杭州记者招待会上预计的时间整整拖延了9个月。书稿拖延的主要原因是，今年春天霍金因肺炎反复发作，住院3个月。这场大病，对于霍金来说，无疑又是一场生死搏斗。大病初愈后不久，他就向我发出邀请，两个月前我在剑桥再次和他会面。此情此景，恍若隔世。到达剑桥当天晚上，他邀我和他共进晚餐、观看电影、品尝佳茗，度过8小时愉快的时光，直到下半夜。可以告慰的是，他的健康恢复得很好。

他的生平无论在科学上，还是在医学上，都堪称奇迹。

正如他在那次记者招待会上告诉我们的，这是一本不仅让青少年，而且让所有人都能理解的书。他将《时间简史》中的艰深部分全部删除，并不失时机地纳入了理论和观测的最近进展。

在相对论和弯曲空间两章，他以引人入胜的方式，把爱因斯坦的狭义相对论和广义相对论阐释得深入浅出，只有他才能这样举重若轻。

最近10年的观测已经确认宇宙的年龄为137亿年。科学家还认为我们生活其中的宇宙是开放的，并永远膨胀下去。不仅如此，其膨胀率正

在不断增大。也就是说，宇宙的膨胀不仅没有因物质的万有引力而减缓，反而由于在宇宙中存在某种暗能量而加速。至于暗能量的机制究竟是什么，这是当代宇宙学的最大课题。

关于寻求宇宙的终极理论，目前的共识是，它很可能是称为M-理论的一个理论网络。M-理论犹如从波浪中诞生的维纳斯女神，正在抖落身上的水珠，将以美丽优雅的形态呈现于世。佛罗伦萨乌菲齐博物馆的波提切利的那幅名画描绘的正是这个场景。

在剑桥期间，我就许多关心的学术问题向霍金请教。离别前夕，在轻松和幽默的气氛中，杜欣欣对他进行了采访。她问了一个长期埋在她以及广大读者心中的问题："史蒂芬，你认为你的黑洞辐射和无边界设想，哪个贡献更为重要？这个问题只有你能够回答。"他揿动鼠标，在屏幕上写出一行字："Otherr peopler thinkr ther blackr hole, r becauser thatr isr nowr accepted, dbutrIrthinkrno-boundary."[他人认为黑洞（辐射）更重要，因为它现在已被接受，我却认为无边界（设想）更重要。]这次采访以及我们和霍金交往20多年的经验将收入《无中生有——霍金和〈时间简史〉》一书中。我们和他相约，在他70岁生日时再来剑桥庆贺。

《时间简史》的主题是人类时空观和宇宙观的变革。作者是宇宙创生理论的创立者和集大成者。《时间简史》和《时间简史（普及版）》必将流传千古。有些朋友担心，这两部书缺乏技术性的细节。但是回顾一下科学史上的经典，即使伟大如《天旋论》和《自然哲学的数学原理》者，后人感兴趣的也只不过是观念的变革，绝非论证的过程。

此书译事始于西湖，终于剑桥，历经一度寒暑。是为序。

吴忠超

2004年12月12日剑桥

·前言·

本书和另一部于1988年首版的书《时间简史》（以下也简称《简史》——编者注）在书名上只有两个字母的差别。《时间简史》曾荣登《伦敦星期日时报》畅销书榜达237周之久，在地球上大约每750人（包括儿童）就拥有一册。就一部论述当代物理学一些最艰深问题的著作而言，其成功是非同寻常的。因为那些艰深的问题又是最激动人心的，由于它们论及重大的基本问题，比如关于宇宙我们究竟知道了什么？我们如何知道这一切？宇宙从何处来，又向何处去？那些问题是《简史》的精髓，也是本书的焦点。

在《简史》出版以来的岁月里，来自全球读者的反馈蜂拥而至。他们不分年龄，也不分职业。人们不断地要求出一种新版本，这种版本既保留《简史》的精髓，又能以一种更清晰更从容的方式解释最重要的概念。从反馈中还得知，尽管有人或许认为这样一部书应取名为《不甚简明的时间历史》，很少有读者要寻求一部长篇大论，那相当于大学水平的宇宙论课程。于是，就采取现在的做法。我们在撰写《时间简史（普及版）》时，保持并扩展了原书的主要内容，还顾及它的长度和可读性。这的确是一部时间的更简明历史。尽管我们删除了一些较专业的内容，却对该书中真正核心的材料进行了更深入的处理。我们觉得这样做是得大于失。

我们在此还不失时机地对原书进行了修订，并且纳入了理论和观测的新成果。《时间简史（普及版）》描述了在寻找一种物理学所有力的完备统一理论方面最近获取的进展。它特别描述了在弦理论以及在表观上不同的物理理论之间的“对偶性”或者对应中获得的进步，这种对偶性表明存在一种物理学的统一理论。在观测方面，这本书包括了诸如那些

通过宇宙背景探测器（COBE）和哈勃空间望远镜所得到的新的重要发现。

大约40年前，里查德·费恩曼说过："我们有幸生活于仍在进行发现的年代。这正如发现美洲一样——你只能发现一回。我们生活的年代正是我们发现自然基本定律的年代。"今天，我们正前所未有地接近理解宇宙的本性。我们写这部书的目的，是想和大家分享这些发现的喜悦，以及由此而涌现出来的现实世界的新的图像。

·第1章·

思索宇宙

我们生存在一个奇妙无比的宇宙中。只有凭借非凡的想象力才能鉴赏其年龄、尺度、狂暴甚至美丽。在这个极其广袤的宇宙中，我们人类所处的地位似乎微不足道。因此我们试图理解这一切的含义，并且了解我们在宇宙中的角色。几十年前，一位著名的科学家（有人认为是伯特兰·罗素）作了一次天文学讲演。他描述地球如何围绕太阳公转，而太阳又如何围绕着一个巨大的恒星集团的中心公转，我们把这个集团称做银河系。讲演结束之际，坐在屋子后排的一位小个子老妇人站起来说道："你讲的是一派胡言，实际上，世界是驮在一只巨大乌龟背上的平板。"这位科学家露出高傲的微笑，然后答道："那么这只乌龟站在什么上面呢？""你很聪明，年轻人，的确很聪明，"老妇人说，"不过，这是一只驮着一只，一直驮下去的乌龟塔啊！"

当今大多数人会觉得，把我们的宇宙喻为一个无限乌龟塔的图像相当荒谬。但是我们凭什么就自认为了解得更好呢？暂时忘却你所知道的——或者认为你所知道的有关空间的知识。然后抬头凝视夜空。你对所有那些光点做何解释呢？它们是微小的火焰吗？它们究竟是什么？真是难以想象，因为这远远地超出了我们的日常经验。如果你是一位定期的观星者，你也许见到过，在晨昏时刻徘徊于地平线附近的闪烁光点。它是一颗行星，即水星，但是它和我们自己所在的这颗行星毫不相像。水星的一天相当于该行星年的2/3。太阳出来时，水星表面温度高达400摄氏度，而在深夜它几乎降到-200摄氏度。尽管水星和我们地球的差别如此之大，但更不可思议的是一个典型的恒星，恒星是一个每秒燃尽几十

亿磅（1磅＝454克）物质的巨大火炉，而它的核心温度达到几千万摄氏度。

行星和恒星究竟离我们多么遥远？这是另一桩难以想象的事。古代中国人建筑石塔以便更近地观测星空。以为恒星和行星比它们在实际上离我们更近得多是很自然的事——在日常生活中，我们毕竟没有和巨大空间距离打交道的经验。它们离我们的距离是如此之遥远，用我们测量大多数长度的办法，即用英尺或者英里去度量，是没有什么意义的。取而代之，我们使用光年，那是光在一年中行进的距离。一束光在1秒内行进1866000英里（1英里＝1.6093千米），这样，一光年便是一个非常长的距离。除了我们的太阳，最近的恒星叫做比邻星（也叫半人马座α星），大约在4光年之外。这是那么遥远，甚至利用当今正在设计的最高速的宇宙飞船，也需要花费大约106000年才能到达那里。

古人曾努力尝试理解宇宙，但是他们还没有发展出我们所知道的数学和科学。今天我们拥有强有力的工具：诸如数学和科学方法的智力工具，以及电脑和望远镜等技术工具。科学家借助这些工具把大量关于空间的知识拼凑在一起。但是关于宇宙，我们究竟知道什么，并且我们何以得到这些知识呢？宇宙从何处来？它又向何处去？宇宙有一个开端吗？如果有的话，在此之前发生了什么？时间的本质是什么？它会到达一个终点吗？我们能在时间中返回到过去吗？物理学中最新的突破，使我们有可能为其中一些悬而未决的问题提供答案，而新技术是实现这些突破的部分原因。对我们而言，这些答案有朝一日会变得和地球围绕太阳公转那么显而易见——或许变得和乌龟塔一样荒谬，只有时间（不管其含义如何）才能裁决。

·第2章·

宇宙演化的图像

尽管迟至克里斯托弗·哥伦布时代，人们还普遍认为地球是平坦的（甚至至今仍有人这么认为），我们可以把现代天文学溯源到古希腊。公元前340年左右，希腊哲学家亚里士多德便撰写了一部题为《论天》的著作。在该书中亚里士多德对地球是一个圆球而不像一块板子那样平坦的信念进行了有力的论证。

一个论证是基于月食。亚里士多德意识到，月食的产生是地球运动到太阳和月球之间引起的，这时地球把它的影子投射到月球上，导致月食发生。亚里士多德注意到，地球的影子总是圆的。如果地球是一个圆球，这正是你所预料的结果，如果它是一个圆盘，就不会这样。如果地球是一个平坦的圆盘，则只有当月食发生在太阳位于圆盘中心的正下方的时刻，它的影子才能是圆的。而在其余的时候影子将会被拉长成椭圆的形状（椭圆是拉长的圆）。

关于地球是圆的，希腊人还有另一个论证。如果地球是平坦的，你可以料想到，从地平线驶来的船首先表现为一个看不清特征的小点。然后，随着它的驶近，你将能够逐渐识别出更多细部，诸如它的帆和船身。但事实并非如此。当一艘船呈现在地平线上的时候，你首先看到的是船帆，船身随后才进入视线。高耸在船身上的桅杆首先露出地平线是地球为球体的一个证据。



海船出现在地平线上

因为地球是一个球体，所以一艘从地平线上驶来的海船，它的桅杆和船帆先显露出来，随后才是船体。

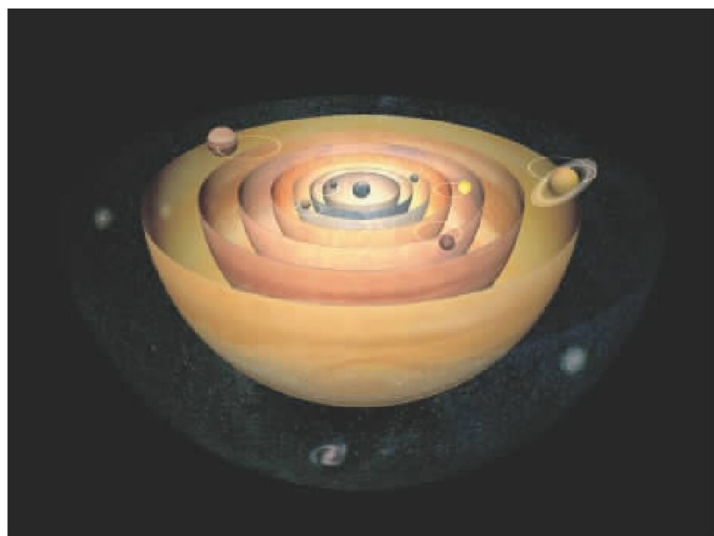
对于夜空，希腊人也给予了极大的关注。直到亚里士多德时代，人们已经在几个世纪里记录了光点在夜空中如何运动。他们注意到，虽然他们看到的成千上万的光点几乎全部似乎一起穿越天穹，但是其中的5个（不算月亮）例外，它们有时离开由东向西的规则轨道逆行，然后又循原路倒退。这些光点被称做行星——希腊语的意思是“漫游者”。希腊人之所以只观测到5颗行星，是因为肉眼只能观察到这5颗行星：水星、金星、火星、木星和土星。现在我们知道行星们为何沿着这种不寻常的路径穿越天空：尽管恒星和我们的太阳系相比较几乎完全不动，而行星围绕着太阳公转，这样它们在夜空中的运动轨迹比遥远的恒星远为复杂。

亚里士多德认为地球是静止的，而太阳、月亮、行星以及恒星沿着圆形的轨道围绕着地球运动。他之所以有这个信念，是因为他觉得由于一些神秘的原因，地球是宇宙的中心，而圆周运动才是最完美的。公元2世纪，另一个希腊人托勒密将这个观念转变成一个完备的天空模型。托勒密对他的研究极度狂热，他写道：“当我快乐地凝视着密布的恒星群进行圆周运动时，我像是双脚凌空，飞上天穹。”

在托勒密的模型中，8个旋转的圆球围绕着地球，每一个圆球依次比前一个圆球更大，这有点像俄罗斯套娃。地球处于这圆球的中心，而位于最远的圆球之外为何物，从未弄得很清楚，但是它肯定不是人类可

观测到的宇宙部分。于是对于宇宙而言，最外面的圆球是某种边界或者容器。恒星在该球面上占据固定的位置，所以当它旋转时，恒星间的相对位置不变，它们作为一个整体，一起旋转着穿越天穹，正如我们所观测到的。内部的圆球携带着行星，它们不像恒星那样被固定在它们各自的圆球上，而是沿着它们的圆球面上的小圆周运动，小圆周又称为本轮。由于行星球旋转，行星本身又在它们的圆球面上运动，因此相对于地球，它们的轨道就显得复杂。托勒密正是以这种方法解释这个事实，即观测到的行星轨道比穿越天穹的简单圆周要复杂得多。

托勒密模型为预言天体在天空的位置提供了一个相当精确的系统。但是为了正确预言这些位置，托勒密不得不假定月亮沿着这样一条轨道前进，在这一轨道上，月亮和地球的距离有时是其他时刻的一半。这就意味着，月亮在某些时刻看起来应当显得是其他时刻的2倍！托勒密承认这是个瑕疵，但是尽管如此，他的模型仍然被普遍地，虽然并非无异议地接受。它在固定的恒星球之外为天堂和地狱留下了大量的空间，由于这一极大优势，基督教会把它当成和《圣经》相符的宇宙图像。



托勒密模型

在托勒密模型中，地球位于宇宙的中心，8个携带当时已知天体的圆球围绕着它。

然而，1514年波兰教士尼古拉·哥白尼提出了另一个模型。（起先，也许哥白尼害怕被教会谴责为异教徒，所以将他的模型匿名地流传。）哥白尼拥有革命的观念，即并非所有天体都必须围绕地球公转。事实

上，他的观念是太阳静止地位于太阳系的中心，而地球和行星在围绕着太阳的圆周轨道上运动。和托勒密模型一样，哥白尼的模型相当成功，但是它和观测并不完全符合。由于它比托勒密模型简单得多，人们也许以为它会被欣然地接受。然而，这个观念几乎花了一个世纪才被认真接受。此后，两位天文学家——德国的约翰斯·开普勒和意大利的伽利略·伽利雷开始公开支持哥白尼理论。

伽利略于1609年开始使用刚发明的望远镜观测夜空。当伽利略观测木星时，他发现几个围绕着它公转的小卫星或月亮伴随着它。这意味着，事情并不像亚里士多德和托勒密所认为的那样，一切都必须直接地围绕着地球公转。在同一时期，开普勒改进了哥白尼理论，提出行星沿着椭圆而非正圆运行。由于这种改进，理论预言一下子就和观测符合起来。这些事件宣告了托勒密模型的死亡。

尽管椭圆轨道改善了哥白尼模型，就开普勒而言，这还仅仅是权宜的假设。那是因为开普勒关于自然的观念不是基于任何观测，而是先入之见：正如亚里士多德一样，开普勒朴实地相信椭圆不如正圆完美。他觉得行星沿着如此不完美的轨道运行的思想太丑，不可能是最后的真理。还有一件使开普勒烦恼的事，他认为磁力迫使行星围绕太阳公转，而椭圆轨道无法和他的这个思想保持一致。尽管他的行星轨道起因于磁力的观念是错误的，我们还是应该把必须有一个力才能引起运动这一认识归功于他。1687年，当艾萨克·牛顿爵士发表了他的《自然哲学的数学原理》，这部很可能是物理科学中有史以来最重要的著作之后，才正确地解释了行星围绕太阳公转的原因，不过那已是很晚的事了。

牛顿在《自然哲学的数学原理》中提出一个定律，这个定律陈述道，除非有一个力作用在静止的物体上，否则所有这些物体自然地保持在静止状态。牛顿还描述了力的效应如何使物体运动或者改变物体的运动。那么，为何行星以椭圆轨道围绕太阳运行呢？牛顿说，这是由一种特别的力引起的，并且宣称这和你释放物体时，使之下落到地面上而不保持静止的力相同。他把那种力命名为引力（牛顿之前，引力这个词的意思要么是严肃的情绪，要么是庄重的品质，而没有别的意思）。他还发明了一种数学，它在数值上可以算出当一个力，比如引力，拉拽物体时后者的反应，而且他解出获得的方程。他能够用这种方法证明，由于太阳的引力，地球和其他行星应该在一个椭圆轨道上运行——正如开普勒所预言的那样！牛顿宣称，他的定律适用于宇宙中的任何东西，从正

在下落的苹果直至恒星和行星。这在人类历史上首次按照定律，既解释了行星的运动，也确定了地球上的运动。它既是现代物理学，也是现代天文学的开端。

抛弃了托勒密球的概念，就不再有任何理由去假定宇宙有一个自然的边界，最外面的球面。而且，因为地球围绕自己的轴自转，恒星就显得似乎在进行穿越天穹的旋转，除此之外，恒星看来是固定不动的，那么认为恒星是像我们太阳一样的，但却非常遥远的物体，就顺理成章了。我们不仅放弃了地球是宇宙中心的思想，而且，甚至认为太阳，也许我们的太阳系在宇宙中都不占有独特的地位。世界观的这一改变象征着人类思想的深刻转变：这是我们现代科学对宇宙理解的开端。

·第3章·

科学理论的本性

为了谈论宇宙的本性，并且讨论诸如它是否有起始或终结的问题，你必须弄清楚什么是科学理论。我们将要采用朴素的观点，即理论只不过是宇宙或者它受限制的一部分的一个模型，以及一组规则，这组规则把这个模型中的量和我们进行的观测相联系。它只存在于我们的头脑中，而不具有任何其他真实性（不管其含义如何）。如果一个理论满足如下两个要求，即是一个好理论。在一个只包含一些任意要素的模型基础上，该理论应能精确地描述大量的观测，而且它还应能明确预言未来的观测结果。例如，亚里士多德相信恩贝多克的理论，万物都是由4种元素：土、气、火和水组成。这是足够简单了，但是它不能够做出任何明确的预言。另一方面，牛顿引力论基于更简单的模型，在该模型中物体相互吸引，其吸引力和称做它们质量的量呈正比，和它们之间的距离的平方呈反比。然而牛顿引力论以很高的精确度预言了太阳、月亮和行星的运动。

任何物理理论都只不过是一个假设，在这个意义上，它只能是暂时的：你永远不能证明它。不管实验的结果多少次和某种理论相一致，你永远不能断定下一次的结果不和该理论相冲突。另一方面，一旦找到哪怕一个单独的和理论预言不一致的观测，就足以将该理论证伪。正如科学哲学家卡尔·波普强调过的，一个好的理论应以下面的事实为特征：它做出一些在原则上可被观测证伪的预言。每一回观察到和预言相一致的新实验，则该理论存活，而我们就增大对它的信赖；但是一旦发现和预言不一致的新观测，我们就必须抛弃或者修正该理论。

人们认为这迟早总会发生，但是你总可以质疑进行该观测人员的能力。

在现实中经常发生的是，设计出的新理论实际上是原先理论的一个扩展。例如，非常精确地观测水星，发现它的运动和牛顿引力论的预言之间有一个微小的差异。爱因斯坦的广义相对论预言了和牛顿理论预言稍微不同的运动。爱因斯坦的预言和观测到的相符合，而牛顿理论做不到，这一事实是对新理论的一个关键性的证实。然而，因为在我们正常处理的情形下，牛顿理论和广义相对论的预言之间差异非常微小，所以在所有实用的场合，我们仍然使用牛顿理论。（牛顿理论还有一个巨大的优势，用它计算比用爱因斯坦理论简单多了！）

科学的终极目的是提供一个描述整个宇宙的统一理论。然而，大多数科学家实际采取的手段是把问题分成两部分。首先，存在告诉我们宇宙如何随时间变化的定律。（如果我们知道宇宙在任一时刻的状态，这些物理定律就告诉我们它在未来任何时刻的状态。）其次，存在宇宙初始状态的问题。有些人觉得科学只应该关心第一部分；他们将初始状态的问题看做玄学或者宗教的事体。他们会说，无所不能的上帝可以随心所欲地启始宇宙。那也许是真的，但是在那种情形下，上帝还可以使宇宙以完全任意的方式发展。然而，似乎上帝决定让它根据一定的定律，以一种非常规则的方式演化。所以似乎可以同等合理地假定，也存在着制约初始状态的定律。



从原子到星系

20世纪上半叶，物理学家把理论的领域从艾萨克·牛顿的日常世界扩展到我们宇宙的最小和最大的两个极端。

毕全功于一役地设计一种能描述宇宙的理论，实际上是非常困难的。换一种方法，我们可将这个问题分成一些小块，并发明一些部分理论。其中每一种部分理论描述并预言某些有限种类的观测，而忽略其他的量的效应，或者将这些效应用简单的数的集合来代表。这样的方法也可能完全错了。如果宇宙中任何事物都以一种基本的方式依赖于其余事物，用隔离法来研究问题的部分也许不可能接近完整的答案。尽管如此，我们过去正是用这种方法取得进展。最好的例子仍然是牛顿引力论，它告诉我们两个物体之间的引力只依赖和每个物体相关的一个数，即它的质量，但和物体的构成无关。这样，我们为了计算太阳和行星的轨道，不需要它们的结构和成分的理论。

当今科学家按照两个基本的部分理论——广义相对论和量子力学来描述宇宙。它们是20世纪上半叶伟大的智慧成就。广义相对论描述引力和宇宙的大尺度结构，也就是从仅仅几英里到大至1亿亿亿（1后面跟244个零）英里的可观测宇宙的结构。另一方面，量子力学处理尺度极端微小的，比如一万亿分之一英寸（1英寸＝2.54厘米）的现象。然而不幸的是，人们知道，这两个理论不能相互协调——它们不可能都正确。当今物理学的一个主要抱负，以及本书的主要论题，便是寻求一种把两者结合在一起的新理论——量子引力论。我们还没有获得这个理论，寻找它的路途也许还相当遥远，但是我们已经知道它必须具有的许多性质。我们在后面的章节中将会看到，关于量子引力论应做出的预言，我们已经知道得相当多了。

现在，如果你相信宇宙不是任意的，而是被明确的定律制约的，你最终必须把部分理论结合成一个完备的统一理论，它描述宇宙中的万物。但是，在寻找这样一个完备的统一理论时，存在一个基本矛盾。在上述有关科学理论的思想中，假定我们是理性的生物，可以随心所欲地观测宇宙，并且从看到的事物中得出逻辑结论。在这样的方案中可以合理地假定，我们可能不断地趋近制约我们宇宙的定律。然而，如果的确存在一个完备的统一理论，它也很可能决定我们的行动——于是，理论本身会决定我们寻求它的结果！而为什么它必须决定我们从这些证据得到正确的结论？难道它不会同样地决定我们得出错误的结论吗？或者根本没有结论？

对于这一诘问，我们仅能给出的回答是基于达尔文的自然选择原理之上的。其思想是，在任何自我繁殖的有机组织群体中，不同个体的遗

传物质和成长存在变异。这些差别意味着，某些个体比其他个体更能得出有关它们周围世界的正确结论并相应地行为。这些个体就更可能存活并繁衍，这样他们的行为和思想模式就会处于优势。下面这一点在过去肯定是真的，我们称做智慧和科学发现的东西传递存活的优势。这种情况是否仍然如此，就不清楚了：我们的科学发现可以轻而易举地把我们所有人都消灭掉，而且即使它们没有这样，一个完备的统一理论对我们存活的机会并没有多大影响。然而，假如宇宙以规则的方式演化至今，我们可以预料，自然选择赋予我们的推理能力，对于我们寻找完备的统一理论方面也会有效，因此，这样就不会误导我们去得到错误的结论。

因为我们已经拥有的部分理论，对除了最极端之外的所有情形都可以做出精确的预言，为了实用的原因，似乎没有太多的理由去寻求宇宙的终极理论。（值得注意的是，虽然类似的议论也可以用来反对相对论和量子力学，然而这些理论给我们既带来了核能，又带来微电子学革命。）因此，发现完备的统一理论也许无助于我们人种的存活。它甚至对我们的生活方式毫无影响。但是自从文明肇始以来，人们总是不满足于把事件视做互不相关和神秘莫测的。我们渴求理解世界的根本秩序。今天我们仍然渴望知道，我们为何在此，以及我们从何而来。哪怕仅仅出于人类对知识的最深切渴求，我们就应该继续探索。而我们的目标不多不少，正是完整地描述我们生活于其中的宇宙。

·第4章·

牛顿之宇宙

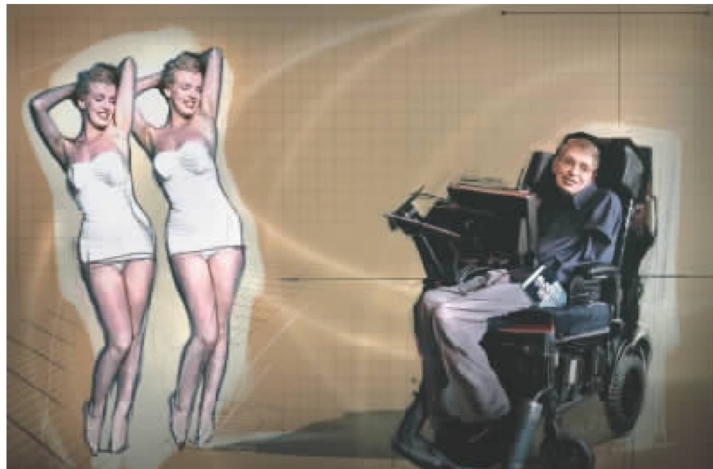
我们现在有关物体运动的观念，可以追溯到伽利略和牛顿。在他们之前，人们相信亚里士多德。他说物体的自然状态是静止的，只有当它受到力或冲量的作用时才运动。因为更重的物体受到更大的朝向地面的拉力，由此推断出，相对于较轻的物体，更重的物体下落得更快。亚里士多德传统还持有这样的观点，人们可以单凭思维即能得出制约宇宙的所有定律：没有必要用观测去检验。所以在伽利略之前，没人费功夫去检查不同重量的物体是否的确以不同速度下落。据说伽利略从意大利的比萨斜塔释放重物，用来证明亚里士多德的信条是错误的。这个故事几乎可以肯定不是真的，但是伽利略确实做了某些等效的事：他让不同重量的球从光滑的斜面上滚下。这情形和重物垂直下落相似，但是由于速度比垂直下落更小，所以更容易观测。伽利略的测量表明，不管每个物体的重量为多少，它们都以相同的速率增加速度。例如，如果你在一个沿着每走10米下降1米的斜面上释放一个球，不论该球有多重，1秒之后它沿斜面运动的速度大约为每秒1米，2秒之后为每秒2米，等等。当然一个铅球比一片羽毛会下落得更快，但是这仅仅是因为空气阻力减缓了羽毛下落的速度。如果你释放两个没有受太大空气阻力的物体，比如两个不同的铅球，它们就会以同样的速度下落（我们很快就会明白它的原因）。在月球上没有空气减缓物体下降的速度，航天员大卫·R·斯各特进行过羽毛和铅球实验，并且发现它们的确同时落到月面上。

牛顿将伽利略的测量当做他的运动定律的基础。在伽利略实验中，当物体沿着斜坡滚下时，总是受到同样的力（它的重量），而该力使它

恒定地加速。这表明，力的真正效应总是改变物体的速度，而不像早先以为的那样仅仅是使之运动。这还意味着，只要物体不受到任何力的作用，它就会以相同的速度保持直线运动。1687年牛顿在《自然哲学的数学原理》首次明确地陈述了这个思想，它称做牛顿第一定律。牛顿第二定律指出，当力作用到一个物体上时会发生什么。该定律陈述道，物体将会加速，或者改变其速度，其改变率和力成正比。（例如，如果力加倍，则加速度就加倍。）物体的质量（或者物质的量）越大，则加速度就越小。（同样的力作用于具有2倍质量的物体将产生一半的加速度。）小轿车可以提供一个熟知的例子：发动机越强有力，则加速度就越大；但是对于同样的发动机，小轿车越重，则加速度就越小。

除了描述物体对力如何反应的运动定律之外，牛顿引力论还描述了如何确定一种特殊种类的力，即引力的强度。正如我们说过的，该理论陈述，任何两个物体都相互吸引，其引力与每一物体的质量成正比。这样，如果其中一个物体（比如说，物体A）的质量加倍，则两物体间的力就变成2倍强。这是可以预料得到的，因为人们可以把这新物体A认为由两个物体组成，每个物体都具有原先的质量。其中的每个用原先的力来吸引物体B。于是，A和B之间的总力应该是原先的力的2倍。而且，比如讲，如果其中一个物体具有6倍质量，或者，一个具有2倍质量而另一个具有3倍质量，那么它们之间的力就有6倍强。

现在你可以看到，为何所有物体以同样速度下落。根据牛顿引力定律，具有2倍质量的物体将受到往下拉的2倍的引力。但是它也有2倍的质量，这样按照牛顿第二定律，每单位力的加速度将被减半。根据牛顿定律，这两个效应刚好相互抵消掉。因此，不管物体的质量多少，它的加速度相同。



复合物体的引力吸引

如果物体的质量加倍，它的引力也加倍。

牛顿引力定律还告诉我们，物体相离越远，引力就越小。该定律说，一个恒星的引力刚好是一半距离的类似恒星引力的1/4。这定律非常精确地预言了地球、月球和行星的轨道。如果这定律改变成恒星引力随距离下降得更快或更慢，则行星的轨道就不会是椭圆；它们要么会向太阳旋进，要么会从太阳逃离。

亚里士多德观念和伽利略及牛顿观念之间的巨大差别在于，亚里士多德相信优越的静止状态，如果一个物体没有受到力或者冲量的作用就会处于这种状态。特别是，他认为地球是静止的。但是从牛顿定律推出，不存在唯一的静止标准。物体A静止，而物体B以恒常速度相对于物体A运动，或者物体B静止而物体A运动，这两种说法是等价的。例如，如果你暂时忽视地球的自转以及它围绕太阳的公转，你可以说，地面静止，而在它上面的一列火车以每小时90英里的速度向北运行，或者火车静止，而地面以每小时90英里的速度向南运动。如果你在火车上进行运动物体的实验，牛顿的所有定律仍然成立。牛顿正确，还是亚里士多德正确，你何以得知？

下面是一种检验：想象你被封闭在一个盒子里，而你不知道这个盒子是停在运行着的火车的地板上，还是停在坚固的地面上，按照亚里士多德的观念，后者是静止标准。有办法确定是哪一种情形吗？如果有的话，也许亚里士多德是正确的——在地面上处于静止状态是特殊的。但是如果你在火车上的盒子里进行实验，其结果正和在“静止的”火车站站台上盒子里一模一样（假定乘火车时铁轨没有隆起、转弯或者缺陷）。

在火车上打乒乓球，你会发现球的行为同在铁轨旁的乒乓球桌上一样。而如果你在盒子里打球，而盒子以相对于地面不同的速度，比如每小时0英里、50英里和90英里的速度运动，在所有这些情形中球的行为都是相同的。世界的行为就是这样，这正是牛顿定律的数学所反映的：无法得知究竟是火车还是地面在运动。运动的概念只有当它相对于其他物体时才有意义。

亚里士多德正确，还是牛顿正确，这关系重大吗？这仅仅是在观点或者哲学上的不同，或者是一个科学上的重要问题？实际上，缺乏静止的绝对标准在物理学上含义深远：它意味着，我们不能确定发生在不同时间的两个事件是否发生在空间中的相同位置上。

为了描述这一点，假定某人在火车上让乒乓球直上直下地弹跳，以1秒的间隔两次撞到桌子上的同一点。对那个人而言，第一次和第二次弹跳位置的空间间隔为零。对于站在铁轨旁的某人，因为火车在这弹跳之间沿着铁轨行进了40米，所以两次弹跳似乎发生在那么远的空间间隔上。按照牛顿的观念，这两位观测者有同等权利认为自己是静止的，所以可以同等地接受这两种观点。一种观点并不比另一种更优越，不像亚里士多德相信的那样。观察到的事件位置以及它们之间的距离，对于在火车上和在铁轨边上的人会是不同的，没有任何理由认为其中一人的观测比另一人的观测更受欢迎。

牛顿对不存在绝对位置或者所谓绝对空间的观念极度忧虑，因为这和他绝对上帝的观念不协调。事实上，尽管他的定律隐含着摒弃绝对空间，但他拒绝接受这一点。许多人，最著名的是贝克莱主教，严厉地批评他的这一非理性信仰。贝克莱是一位相信一切物体、空间以及时间都是幻觉的哲学家。当著名的约翰逊博士得知贝克莱的主张时，他把脚趾踢到大石块上叫道：“我这样反驳它！”

不管是亚里士多德还是牛顿都相信绝对时间。也就是说，他们相信人们可以毫无歧义地测量两个事件之间的时间间隔，而且只要使用好的时钟，不管谁去测量，这个时间都是一样的。不像绝对空间，绝对时间和牛顿定律相协调。而且这是大多数人当做常识的观点。然而，在20世纪，科学家们意识到，他们必须改变他们的时间和空间观念。正如我们将要看到的，他们发现事件之间的时间长度，正如乒乓球弹跳点之间的距离一样，与观察者有关。他们还发现时间不能和空间完全分离并和空间无关。对光性质新的洞察是觉察这些的关键。它们似乎和我们的经验

相违背，但是尽管我们的常识观念在处理诸如苹果和行星等运动得比较慢的物体时有效，这些常识观念在处理以光速或接近光速运动的物体时却完全失效。



距离的相对性

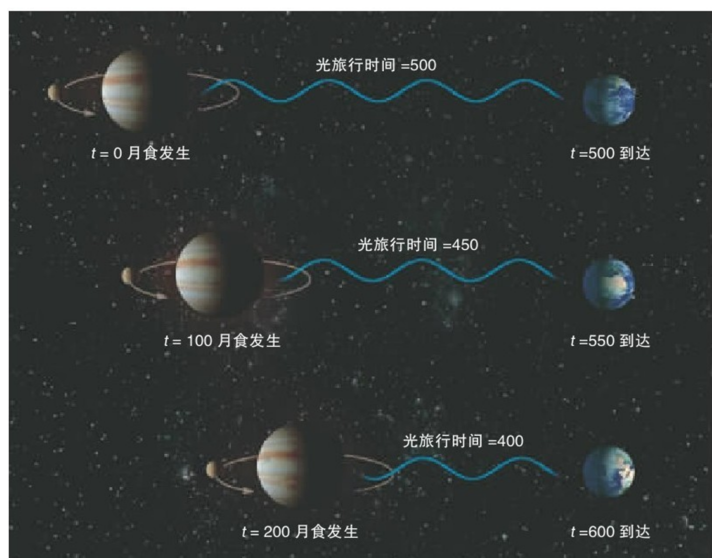
对不同的观察者，物体旅行的距离——和路径——可以显得不一样。

·第5章·
相对论

1676年丹麦天文学家欧尔·克里斯琴森·罗默首次发现，光以有限但非常高的速度行进。如果你观察木星的卫星，你就会注意到，它们不时地从视野中消失，这是因为它们走到这颗巨大行星的背后。这些木星卫星的月食应该以规则的时间间隔发生，但是罗默观测到这些月食并没有以相等的时间间隔发生。卫星在它们的轨道上，是否不知怎么有时加快，有时减慢呢？他给出了另外的解释。如果光以无限的速度行进，那么我们就会在月食发生的同一时刻，在地球上看见它们以规则的间隔发生，犹如宇宙之钟的滴答声。由于光在同一时刻穿越任何距离，无论木星靠近或者离开地球，这种情形都不会改变。

现在想象光以有限速度行进。如果这样的话，我们将在每次月食发生之后的某一时间看到它。这个延迟依赖光速，以及木星和地球的距离。如果木星不改变它离开地球的距离，则每一次对月食延迟的时间都会是相同的。然而，木星有时运动得离地球更近。在这种情形下，从每次接续月食来的"信号"行进的距离越来越短，这样它比木星若保持在常数距离时来的"信号"不断提早地到达。由于类似的原因，当木星从地球退离，我们看到月食比预料的不断地延后。这种提早或延迟到达的程度依光速而定，而这就允许我们去测量它。这正是罗默所做的。他注意到，在一年里，当地球接近木星轨道时，木星的一个卫星的月食出现提早，而当地球离开时推迟出现，而且他利用这个差计算出光速。然而，他不能很精确地测量地球离开木星距离的变化，与光速的现代每秒1866000英里的值相比，他的光速的值为每秒1406000英里。尽管如

此，罗默不仅证明了光以有限的速度行进，而且还测量了那个速度，其成就是卓越的，要明白，这是在牛顿发表《自然哲学的数学原理》之前11年进行的。



光速和月食发生的时刻

观察到的木星卫星月食的时刻既依赖于月食实际发生的时刻，也依赖于光从木星行进到地球花费的时间。这样，当木星向地球运动时，月食发生得较频繁，而当木星离开地球运动时，月食发生得较不频繁。为了明晰，本图将效应夸大了。

1865年英国物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦提出了一个理论，它成功地统一了直到那时用来描述电力和磁力的部分理论。这时我们才得到了光传播的正确理论。虽然在古代人们就知道电和磁，但是直到18世纪，英国化学家亨利·卡文迪许和法国物理学家查尔斯·奥古斯丁·库仑才建立了制约两个带电物体之间电力的定量定律。几十年之后，在19世纪早期，一些物理学家建立了磁力的类似定律。麦克斯韦在数学上证明了，这些电力和磁力不是由粒子之间相互直接作用引起的；而是每个电荷和电流在周围空间产生一个场，场将力作用在位于那个空间内的其他每一个电荷和电流上。他发现每一个单独的场都携带电力和磁力，这样电和磁都是同一个力的不可分离的方面。他把这个力称做电磁力，而携带它的场称做电磁场。

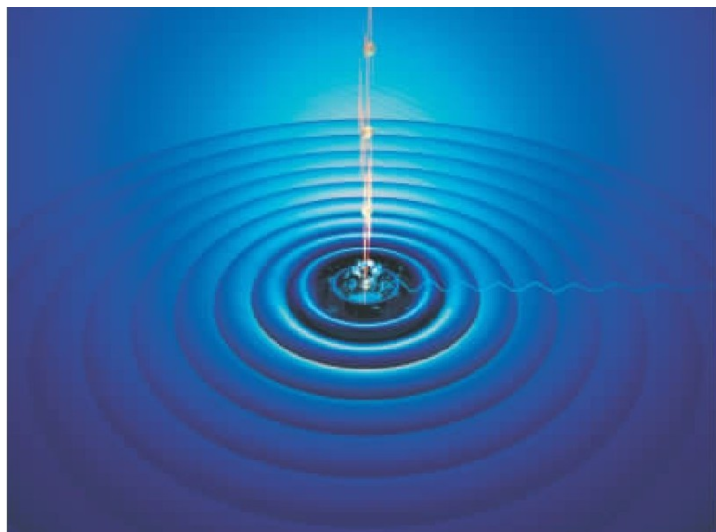
麦克斯韦方程预言，在电磁场中可能存在波状的微扰，这些微扰以固定的速度行进，正如池塘水面的涟漪那样。当他计算这一速度时，发

现它和光速恰好一致！今天我们知道，当麦克斯韦波的波长在百万分之四十厘米至百万分之八十厘米之间时，人眼可以把它作为光看到。（波是一串连续的波峰和波谷；波长是波峰或波谷之间的距离。）波长比可见光波长更短的波称为紫外线、X射线以及伽马射线。具有更长波长的波称为射电波（1米或更长）、微波（1厘米左右）或者红外线（比万分之一厘米短，但比可见光的波长长）。

麦克斯韦理论意味着，射电或者光波以某种固定速度行进。这很难和牛顿理论中不存在静止的绝对标准的观点相和谐。因为如果不存在这样的标准，关于物体速度就不可能存在普适的意见。为了理解其中的原因，再次想象你在火车上打乒乓球。如果你把球击到火车的前面，你的对手测量到球的速度为每小时10英里，那么你可以预料到，在站台上的一个观察者发觉球以每小时100英里速度运动——其中每小时10英里是它相对于火车的运动，加上每小时90英里是火车相对于站台的运动。球的速度是多少呢，每小时10英里还是100英里？你如何定义它——相对于火车呢，还是相对于地面？你不能在没有绝对静止的标准下指定球的绝对速度。可以同样合理地说，同一个球具有任何速度，这依赖于测量该速度的参考系。根据牛顿理论，以上论述对于光也应该是成立的。那么，对麦克斯韦理论中的光波以某一固定的速度行进，这意味着什么？

为了让麦克斯韦理论和牛顿定律相协调，人们提出存在一种称为以太的物质，它无所不在，甚至存在于“空虚的”真空中。以太观念对于科学家还有某种额外的吸引力，他们觉得正如水之于水波或者空气之于声波，毕竟需要某种媒介去负载电磁能的波动。按照这种观点，光波通过以太行进，正如声波通过空气行进一样，因此从麦克斯韦方程推出它们的“速度”必须相对于以太来测量。按照这个观点，不同观察者会看到，光以不同的速度射向他们，但是光相对于以太的速度将保持不变。

人们可以检验这个思想。想象从某个光源发射出光。根据以太理论，光以光速穿越以太行进。如果你穿过以太向它运动，你趋近光的速度将是光通过以太的速度和你穿过以太的速度之和。光将比假设你不动或者你沿着其他方向运动更快地趋近于你。然而，因为和我们对着光源运动的速度相比较，光的速度如此之巨大，所以测量这个速度差异的效应非常困难。



波长

波长是连续波峰或波谷之间的距离。

1887年阿尔伯特·迈克耳孙（他后来成为第一个获得诺贝尔物理奖的美国人）和爱德华·莫雷在克里夫兰的凯思应用科学学校（现在的凯思西储大学）做了一个非常精细而困难的实验。他们意识到，因为地球几乎以每秒20英里的速度围绕太阳公转，他们的实验室本身必须以相对高的速度穿越以太运动。当然，没有人知道以太相对于太阳沿着哪个方向，多快，或者究竟是否在运动。但是在一年中的不同时间重复实验，由于地球在其轨道的不同位置上，他们有望解释这一未知的因素。这样，迈克耳孙和莫雷着手一个实验，去比较在地球通过以太运动的方向上的（当我们向着光源运动时），和与该运动成直角的方向上的（当我们不向着光源运动时）光速。他们发现在两个方向上的速度完全相同，这使他们大吃一惊！



乒乓球的不同速度

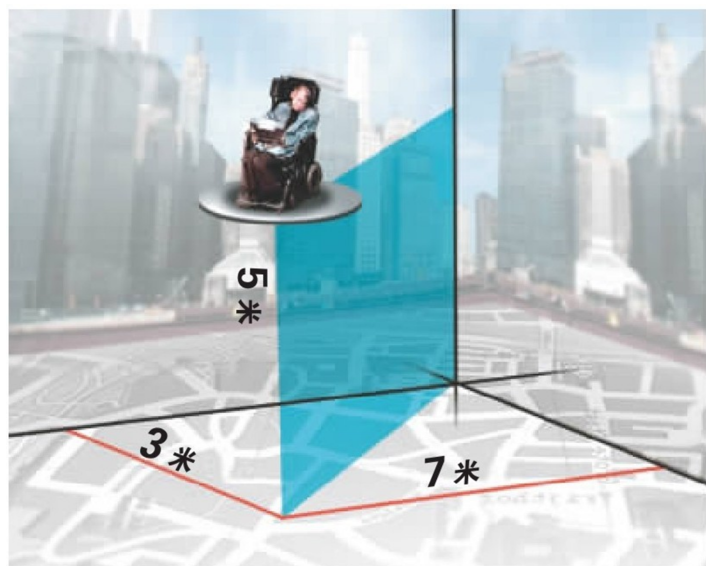
根据相对论，虽然观察者测量到的物体速度可以不同，但是每个人的测量是同等有效的。

1887年至1905年之间科学家们做过几次尝试，以挽救以太理论。最著名的是荷兰物理学家亨德利克·洛伦兹做的，他企图按照当物体和钟表通过以太运动时分别收缩和变慢，去解释迈克耳孙-莫雷实验的结果。然而，1905年一位瑞士专利局的直到当时还默默无闻的职员阿尔伯特·爱因斯坦在一篇著名的论文中指出，只要人们愿意抛弃绝对时间的观念，以太的观念就纯属多余（我们很快就会知道为什么）。法国著名的数学家亨利·庞加莱几周之后提出了类似的观点。爱因斯坦的论证比庞加莱更接近物理，后者把这个问题看成纯粹是数学的，而且至死不接受爱因斯坦的理论解释。

顾名思义，爱因斯坦相对论的基本假说陈述道，对于所有无论以任何速度自由运动的观察者，科学定律必须相同。这适用于牛顿运动定律，但是爱因斯坦现在将这种思想推广，包括了麦克斯韦理论。换言之，由于麦克斯韦理论指出光速具有给定的值，任何自由运动的观察者，无论离开或趋近光源多快，他们都一定会测量到同样的值。这个简单的思想当然解释了麦克斯韦方程中光速的意义——而且不必使用以太

或者其他任何优越的参考系——此外它还有某些令人印象深刻的而且通常是反直觉的推论。

例如，要求所有观察者必须在光行进多快的问题上取得一致意见，迫使我们改变时间的概念。再次想象快速行进的火车。我们在第4章看到，虽然在火车上把乒乓球打得上上下下的某人会说，球只行进了几英寸，但是站在站台上的某人会觉得球大约行进了40米。类似地，如果火车上的观察者发出闪光，这两位观察者在光行进的距离上不能取得一致意见。由于速度是距离除以时间，如果他们在光行进的距离上意见不一致，那么让他们在光速上意见一致的唯一办法是，他们关于该行程所花费的时间上的意见也不一致。换言之，相对论使绝对时间的观念寿终正寝！相反，每个观察者必须拥有自己的时间测量，由他自己携带的钟表所记录，而不同观察者携带的同样的钟表并不一定同步。



空间中的坐标

当我们说空间有三维，我们是指需要用3个数或坐标去指明一点。如果把时间加到我们的描述之上，那么空间就变成四维的时空。

在相对论中没有必要引进以太的观念，正如迈克耳孙-莫雷实验所显示的，根本检测不到以太的存在。相反，相对论迫使我们从根本上改变空间和时间观念。我们必须接受，时间不能完全地和空间分离并且独立于它，而是和它相结合，形成一个称做时空的客体。这些都是不容易掌握的思想，甚至连物理学家们也花了许多年才普遍接受相对论。爱因斯坦能够孕育出相对论，展现了他无与伦比的想象力。他还从相对论导出

许多推论，尽管它似乎会引出古怪的结论，这显示了他对自己逻辑的自信。

我们可以用3个数或坐标来描述空间中一点的位置，这是一个常识。例如，我们可以说房间中的一点距离一堵墙7米，距离另一堵墙3米，而且比地板高5米。或者我们可以指明一个点处于一定的纬度、经度以及海拔。我们可以自由使用任何3个适当的坐标，尽管它们只在有限的范围内有效。根据皮卡迪里广场以北和以西多少英里，以及高于海平面多少英尺来指明月球的位置是不现实的。相反，我们可以按照离开太阳的距离，离开行星轨道面的距离，以及月球到太阳的连线和太阳到附近的恒星例如比邻星连线的夹角来描述它。这些坐标甚至在描述太阳在我们星系中的位置，或者我们的星系在本星系群中的位置时，也没有太多用处。事实上，我们可以用一组相互交叠的坐标碎片来描述整个宇宙。在每一碎片中，我们可用3个坐标的不同集合来指明一点的位置。

在相对论的时空中，可用4个数或坐标来指明任何事件——也就是在特定时刻在空间中特定点发生的任何事。重说一遍，坐标的选择是任意的：我们可以利用任何3个定义得很好的空间坐标和任何时间测度。但是在相对论中，不可能真正地区分空间和时间坐标，如同不可能真正地区分任何两个空间坐标一样。我们可以选择一组新的坐标，比如说第一个空间坐标是旧的第一个和第二个空间坐标的组合。于是，为了测量地面上一点的位置，我们可以利用皮卡迪里东北多少英里和西北多少英里，来替代在皮卡迪里以北多少英里和以西多少英里去测量。类似地，我们可以使用新的时间坐标，它是旧的时间（以秒为单位）加上皮卡迪里往北的距离（以光秒为单位）。

相对论的另一个众所周知的推论是，质量和能量是等效的。这被概括在爱因斯坦著名的方程$E=mc^2$（此处E为能量，m为质量，而c为光速）中。人们经常使用这个方程计算，比如讲，如果把一些物质转变成纯粹电磁辐射时会产生多少能量。（因为光速是一个很大的数，其答案是能量很大——转变成毁灭广岛市炸弹中能量的物质，其重量还不到1盎司。）但是这个方程还告诉我们，如果一个物体的能量增加，它的质量也会增加，也就是它对加速或者速度改变的抵抗也增加。

能量的一种形式是运动的能量，称做动能。正如使你的小轿车运动需要能量一样，增加任何物体的速度都需要能量。一个运动物体的动能等同于使它运动必须花费的能量。所以，一个物体运动得越快，它所拥

有的动能越多。但是根据能量和质量等效，动能增加了物体的质量，所以物体运动得越快，进一步增加该物体的速度就越困难。

只有当物体以接近于光速的速度运动时，这个效应才真正有意义。例如，一个物体具有10%的光速时，其质量只比正常大0.5%，而具有90%光速时，其质量会比正常质量的2倍还大。当一个物体接近光速时，其质量会上升得越来越快，这就需要越来越多的能量才能使它进一步加速。根据相对性理论，一个物体事实上永远达不到光速，这是因为到那时它的质量会变成无限大，而由于质量和能量等效，需要无限大的能量才能达到目的。这就是任何正常物体永远受相对论限制，以慢于光速的速度运动的原因。只有光，或者其他没有内禀质量的波可以以光速运动。

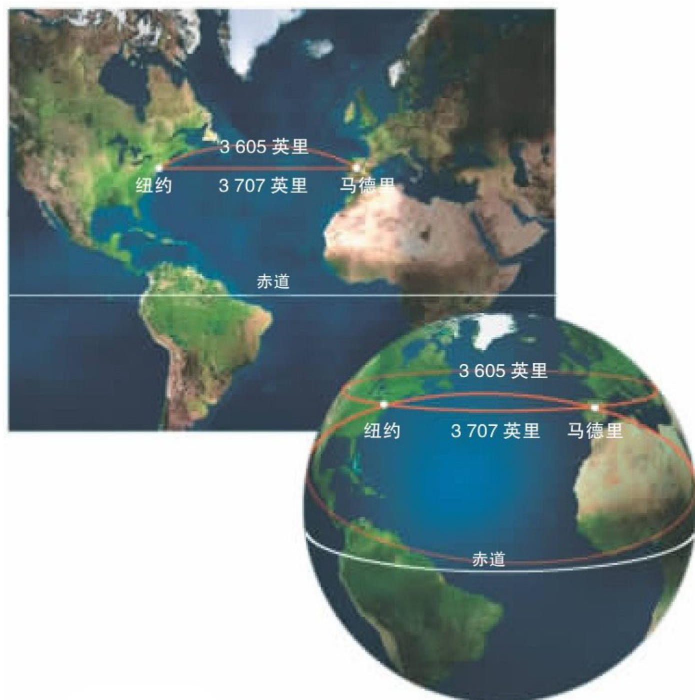
爱因斯坦1905年的相对性理论称做狭义相对论。这是因为，尽管它非常成功地解释了光速对所有观测者都是相同的，以及当物体以接近光速的速度运动时会发生什么，但是它和牛顿引力论不相协调。牛顿理论说，在任何给定时刻物体之间相互吸引，其引力依赖于那个时刻它们之间的距离。这意味着，如果你移动其中一个物体，那么加到另一个物体上的力会即刻改变。如果，比如讲太阳忽然消失了，麦克斯韦理论告诉我们，地球直到8分钟后才会变暗（由于这正是光从太阳到达我们所需要的时间）。但是根据牛顿引力论，地球会立刻觉察到太阳的吸引不复存在而飞离轨道。这样太阳消失的引力效应以无限大的速度，而不像狭义相对论要求的那样，以光速或者低于光速到达我们这里。在1908年和1914年之间爱因斯坦进行了一些未能成功的尝试，去寻找一个和狭义相对论相协调的引力论。1915年，他终于提出了一个更具革命性的理论，也就是我们现在称为广义相对论的理论。

·第6章·

弯曲空间

爱因斯坦的广义相对论是基于一个革命性的设想，引力和其他力不同，它不是力，只不过是时空并非平坦这一事实的结果，而早先人们以为时空是平坦的。在广义相对论中，在时空中的质量和能量的分布使时空弯曲或“翘曲”。诸如地球这样的物体并非受到称做引力的力的作用而沿着弯曲轨道运动；相反，它们之所以沿着弯曲轨道运动，是因为在弯曲空间中，它们遵循着一条最接近直线的路径运动，这个路径称做测地线。用专业语言来说，测地线的定义就是相邻两点之间的最短（或最长）的路径。

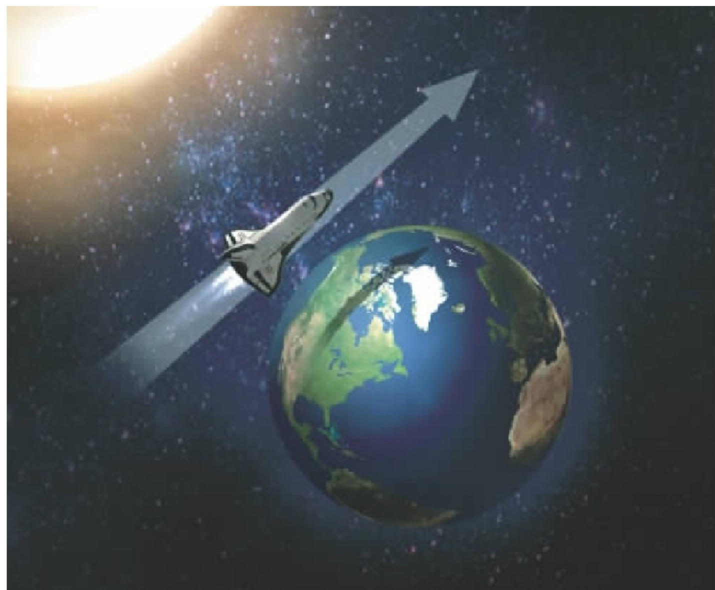
几何平面是二维平坦空间的一个例子，在它上面的测地线是直线。地球的表面是一个二维的弯曲空间。地球上的测地线称做大圆。赤道就是一个大圆。地球上其中心和地心重合的任何其他的圆也都是大圆。（这些是在地球上你能画出的最大的圆，这个事实是术语“大圆”的来源。）由于测地线是两个机场之间的最短的路径，这就是航线领航员告诉驾驶员飞行的轨道。例如，你可以从纽约到马德里，按照罗盘，几乎是一直往东，沿着它们的共同纬线飞行33707英里。但是如果沿着大圆首先往东北方向，然后逐渐转向东方，最后转向东南方向飞，只要飞33605英里即能到达那里。在一张地图上呈现出的这两条路径是令人误解的，地球表面在该地图上被畸变（拉平）了。当你“笔直”往东运动时，你并不真正地笔直运动，至少在最直接的路径即测地线的意义上说不是笔直的。



地球上的距离

地球上的两点之间的最短距离是沿着一个大圆。在一张平坦的地图上，最短距离不对应于一条直线。

在广义相对论中，物体在四维时空中总是沿着测地线运动。在没有物质时，这些在四维时空中的测地线对应于三维空间中的直线。在物质存在时，四维时空畸变了，使物体在三维空间中的路径弯曲。在旧的牛顿理论中，这种弯曲的方式被解释成引力吸引的效应。这和观看飞机在多山的地面上空飞行相当类似。飞机也许是在一条直线上飞越三维空间，但是除去第三维——高度——时，你会发现它在多山的地面上的影子是沿着一道弯曲的路径。或者想象一艘宇宙飞船在一条直线上飞越空间，直接通过北极上空，将它的路径投影到地球的二维表面上，你会发现它沿着半圆，在北半球上画出一条经线。太阳的质量弯曲时空，使得地球虽然在四维时空中遵循笔直的路径，但我们在三维空间中看去，它却是沿着一个几乎圆周的轨道运动。这是一个很难摹绘的现象。

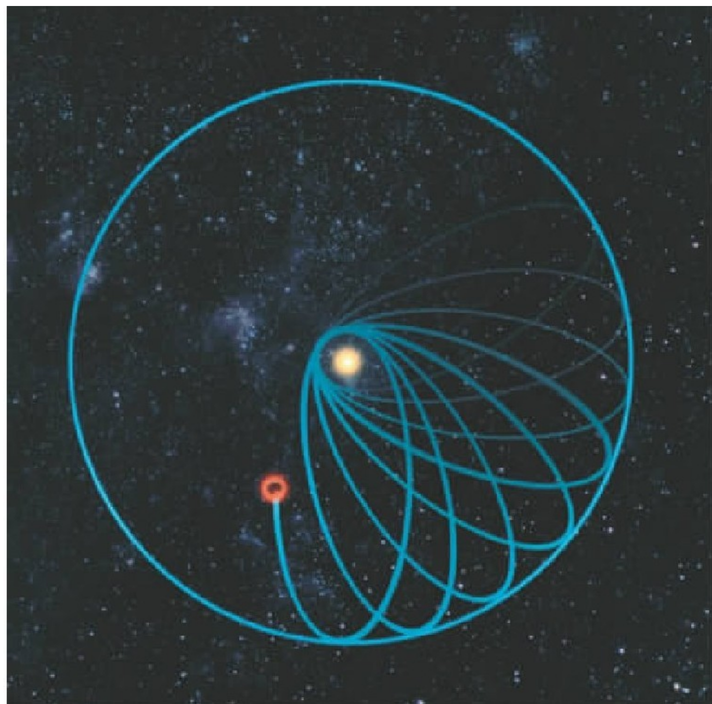


宇宙飞船影子的路径

宇宙飞船在空间中沿直线飞行，把它的路径投影到二维的地面上就显得是弯曲的。

实际上，尽管广义相对论和牛顿引力论推导的方法不同，但由它们预言的行星轨道几乎完全相同。水星轨道的偏差最大。作为最接近太阳的行星，水星受到最强大的引力效应，并且它的椭圆轨道被拉伸得相当厉害。广义相对论预言，该椭圆的长轴应该以大约每100000年1度的速率旋转。尽管这个效应很小，但它还是在1915年之前很久就被注意到了（见第3章），而且它成为爱因斯坦理论的最早验证之一。近年来，人们用雷达测量到其他行星轨道和牛顿预言的甚至更为微小的偏差，并且发现和广义相对论的预言一致。

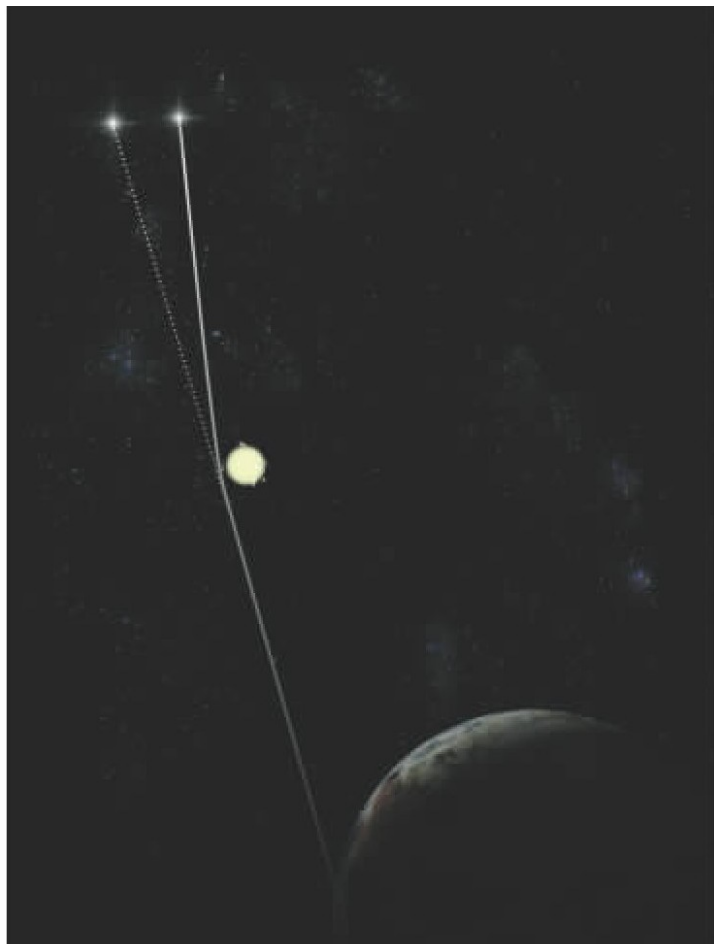
光线在时空中也必须遵循测地线。再说一遍，空间是弯曲的这个事实意味着，在空间中，光显得不再沿着直线行进，这样广义相对论预言引力场应当弯折光线。例如，该理论预言，由于太阳质量的缘故，在太阳附近的光的路径，会向里稍微弯曲。这意味着，从遥远恒星来的恰好通过太阳附近的光会偏折一个小的角度，于是地球上的观测者发觉，该恒星出现在不同的位置上。当然，如果从恒星来的光线总是在太阳邻近通过，我们就无法得知光线是被偏折呢，还是恒星本来就在我们似乎看到它的地方。然而，由于地球围绕太阳公转，不同的恒星便显得在太阳背后通过，并使它们的光线受到偏折。因此，它们相对于其他恒星的表观位置发生改变。



水星轨道的进动

随着水星重复地围绕着太阳公转，它的椭圆路径的长轴缓慢地旋转，这个长轴大约每330000000年转一圈。

因为太阳的光亮，人们不可能观测到在天空中邻近太阳出现的恒星，所以在通常情形下，观察这个效应是非常困难的。然而，当日食发生时就能做到，那时月球把太阳光阻挡住了。由于1915年第一次世界大战正在进行，所以不能立即验证爱因斯坦的光偏折预言。直到1919年，一支英国的远征队从西非的海岸观测日食，证明了光线的确被太阳偏折，正如理论所预言的那样。英国科学家对德国理论的这次证明被欢呼为战后两国和好的伟大行动。具有讽刺意味的是，后来人们检查这次探险所拍的照片，发现其误差和企图测量的效应同样大。他们的测量纯属运气，或许是由于已知所要得到的结果——这在科学上时有发生。然而，后来的观测多次准确地证实了光的偏折。



光线在太阳附近的弯曲

当太阳几乎刚好处于地球和一个遥远恒星之间时，太阳的引力场把星光偏折，改变了恒星的表观位置。

广义相对论的另一个预言是，在诸如地球这样的大质量物体附近，时间流逝应该显得较缓慢一些。爱因斯坦在1907年就首次意识到这一点，这比他意识到引力还会改变空间形状要早5年，而且比他完成他的理论要早8年。爱因斯坦利用他的等效原理推导出这个效应。等效原理在广义相对论中的作用正如基本假设对于狭义相对论一样。

回顾一下，狭义相对论的基本假设是说：对所有自由运动的观察者而言，不管其运动的速度多大，科学定律必须是相同的。粗略地讲，等效原理将此推广到那些不是自由运动而是在引力场影响下的观察者。在精确陈述这个原理时有些技术细节，诸如引力场并非均匀这一事实，你必须对微小的、互相交叠的区域分别应用这个原理，但是我们在此不理

睬它。为了我们的目的，我们可以用如下方式叙述这个原理：在足够小的空间区域中，不可能区分你是静止地处于引力场中，还是在空虚的空间中做匀加速运动。

想象你在空虚空间中的一台升降机内。不存在引力，没有“向上”，也没有“向下”。你在自由地漂浮。现在升降机开始做等加速运动，你突然感觉到重量。那就是说，你感觉到往升降机一端的拉力，突然使你觉得这一端仿佛是地板！如果你现在拿出一个苹果并释放之，它就掉到地板上。事实上，现在你正在加速，发生在升降机内的一切事情呈现出仿佛升降机根本不动，而静止地处于一个均匀的引力场中一样。爱因斯坦意识到，正如你从火车内不能得知你是否在做匀速运动一样，你从升降机内也不能得知，你是在均匀地加速运动呢，还是处于均匀的引力场中。这就导出了他的等效原理。

等效原理以及它的上述例子，只有当惯性质量（牛顿第二定律中的质量，它决定你加速多少，以回应外力）和引力质量（牛顿引力定律中的质量，它决定你感受到多大的引力）（见第4章）是同一东西时，才能成立。那是因为如果两种质量是相同的，那么引力场中的所有物体将以相同的速率下落，而不管它们的质量是多少。如果这个等效不真，那么在引力影响下，某些物体会比另一些下落得更快，而这样你就可以把引力拉力和均匀加速区分开来，对于均匀加速的情形所有东西的确都以相同的速率下落。爱因斯坦利用惯性质量和引力质量等效去推导他的等效原理，并最终得出整个广义相对论，堪称人类思想史上无与伦比的逻辑推理的无畏进军。

现在我们通晓了等效原理，可以着手跟随爱因斯坦的逻辑进行另外的理想实验，以展示为何时间一定会受引力的影响。请设想在太空中有一艘火箭飞船。为了方便起见，想象该火箭飞船如此之长，光要1秒才能从顶部穿越到底部。最后，假定在火箭飞船的天花板上和地板上各有一名观察者，每人都携带一个每秒滴答响一下的完全相同的钟表。

假定天花板观察者等到钟表的滴答，就立即给地板观察者发送光信号。天花板观察者在钟表的下一次滴答时再重复这样做。依照这个架构，每个信号行进1秒，然后被地板观察者接收到。这样，正如天花板观察者在相隔1秒的时间发送出两次光信号，地板观察者也在相隔1秒的时间收到两次光信号。

如果火箭飞船停在地球上受引力的影响，而不在天外自由浮动，这个情形会有什么不同呢？根据牛顿的理论，引力对此毫无效应。如果天花板观察者发送间隔1秒的信号，那么地板观察者将在间隔1秒接收到它们。但是等效原理却做出不同的预言。考虑到均匀加速的效应，而非引力效应，这个原理告诉我们将会看到发生什么。这是爱因斯坦利用等效原理创造他的新引力理论方法的一个例子。

现在我们假定，火箭飞船正在加速。（我们想象，它加速得这么慢，使我们不会接近光速！）由于火箭飞船向上运动，因此第一个信号比以前行进的距离要少，所以将比1秒更短的时间到达。如果火箭以恒常速度运动，则第二个信号将会以刚好同样的时间提前量到达这里，这样两个信号之间的时间间隔仍会是1秒。但是由于加速，火箭在第二个信号发送出时甚至会比在发出第一个信号时运动得更快，这样第二个信号穿越的距离甚至比第一个更小，从而在甚至更少的时间内到达。因此，地板观察者将会测量到短于1秒的信号间隔，他和天花板观察者有分歧，后者宣称刚好以1秒间隔发送过信号。

在火箭飞船加速航行的情形下，这也许还不至于令人吃惊——我们仅仅对它进行了解释！但是要记住，等效原理说，它还适用于静止于引力场中的火箭飞船。这意味着，即使飞船不加速，比如说，停在地球表面的发射台上，如果天花板观察者向地板每隔1秒（按照他的钟表）发射信号，地板观察者也将在更短的间隔时（按照他的钟表）接收到信号。这真是令人吃惊！

你也许仍然会问：这是否意味着引力改变时间，或者它只不过毁坏了钟表？假设地板观察者爬到天花板上去，他和他的伙伴在上面对表。他们是同样的钟表，而且可以肯定，两位观察者将会发现他们这时在1秒的长度上是一致的。地板观察者的钟表没有任何毛病：不管它碰巧放在何处，它总是测量当地时间的流逝。正如狭义相对论告诉我们的，对于相对运动的观察者们，时间推移得不一样；广义相对论告诉我们，对于在一个引力场中不同高度的观察者，时间推移得不一样。根据广义相对论，由于时间在接近地球表面处运动得更慢，所以地板观察者在信号之间测量到短于1秒的时间。引力场越强，这个效应就越大。牛顿的运动定律终结了空间中绝对位置的观念。现在我们已经看到，相对性理论如何摆脱了绝对时间。

1962年，人们利用安装在水塔顶部和底部的一对非常精密的钟表，

检验了这个预言。在底部的钟表更接近地球，发现它走得较慢，和广义相对论精确地一致。这个效应很小——和地球表面上的钟表相比较，在太阳表面上的钟表1年才大约走快1分。然而，随着依赖卫星信号的非常精密的导航系统的发明，在地球上方的不同高度钟表的速率之差，目前在实用上相当重要。如果无视广义相对论的这个预言，计算得出的位置会差几英里！

时间流逝的这些改变同样影响我们的生物钟。假定一对双胞胎中的一位住在一座山顶上，另一位留在海平面上，则第一位双胞胎比第二位衰老得更快。于是，如果他们再次相遇，一位就比另一位更老。在这种情形下，年龄的差异会非常微小，但是如果双胞胎中的一位乘坐宇宙飞船去进行一次长途旅行，他被加速到接近光速，则差异就大得多。当他返回时，他就比留在地球上的那一位年轻得多。这称做双生子佯谬，但是只有当你在内心还有绝对时间观念之时，这才是一个佯谬。在相对性理论中不存在唯一的绝对时间；相反，每一个体都有其自身的个人时间测度，这个测度依他在何处以及如何运动而定。

1915年以前，人们认为空间和时间仅仅是个固定的舞台，事件在其上发生，但舞台不受发生事件的影响，甚至在狭义相对论中也是如此。物体运动，力吸引和排斥，但是时间和空间简单地延续而不受影响。人们很自然地认为空间和时间会永远延伸下去。然而，在广义相对论中情况完全不同。现在空间和时间是动力量：当一个物体运动时，或者一个力作用时，它影响空间和时间的曲率——而时空结构反过来也影响物体运动和力作用的方式。空间和时间不仅影响宇宙中发生的一切，而且受后者的影响。正因为我们在谈论宇宙中发生的事件时不能不提到空间和时间的概念，在广义相对论中谈论在宇宙界限之外的空间和时间也是没有意义的。1915年之后的几十年间，对空间和时间的这个新理解变革了我们的宇宙观。正如我们将要看到的，一个动态的膨胀的宇宙的观念已经取代一个本质上不变的宇宙的旧观念。一个不变的宇宙也许已经存在了无限久远，并将继续无限久地存在，而一个动态的宇宙似乎在有限的过去起始，也许会在将来的有限时间内终结。

·第7章·

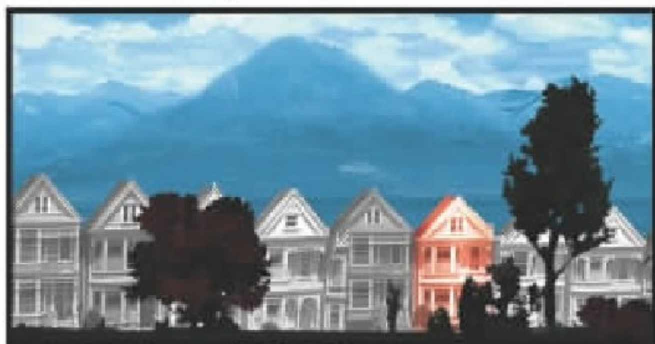
膨胀的宇宙

如果你在一个清澈无月的夜晚仰望星空，你可能看到的最亮的星体是金星、火星、木星和土星，还有数目巨大的类似我们太阳的，但离开我们遥远得多的恒星。事实上，当地球围绕着太阳公转时，这些固定的恒星中的一些，相互之间的位置呈现出非常微小的改变。它们绝非完全固定不动的！这是因为它们距离我们相对接近一些。随着地球围绕着太阳公转，相对于更远处的恒星背景，我们从不同的位置观测较近的恒星。这个效应和你在空旷的路上驾车时所看到的景象很类似，以地平线上的任何东西为背景，附近树木的相对位置仿佛在变化。树木愈近，似乎运动愈甚。这种相对位置之变化称为视差（见44页插图）。说到恒星，这真是幸运，因为它使得我们能直接测量这些恒星与我们的距离。

正如我们在第1章提到的，最近的恒星比邻星大约有4光年或者2300000亿英里那么遥远，其他大多数肉眼可见的恒星离开我们的距离均在几百光年之内。与之相比，我们和太阳仅仅有8光分之遥！可见的恒星看起来散布在整个夜空，但是特别集中在一条我们称为银河的带子上。







视差

无论你在路上还是在空间中运动，当你行进的时候，近处和远处物体的相对位置随之变化，测量这种变化可以用于确定物体的相对距离。

早在公元1750年就有一些天文学家提出，如果大部分可见的恒星处在单独的碟状结构中，就可以解释银河的外观。该碟状结构便是我们现在称为螺旋星系的一个例子。之后不到几十年后，天文学家威廉·赫歇尔爵士就非常精心地对大量恒星的位置和距离进行编目分类，从而证实了

这个观念。即便如此，直到20世纪初人们才完全接受这个思想。我们现在知道，银河系——我们的星系——大约有10万光年宽并且缓慢旋转；它螺旋臂上的恒星每几亿年围绕着它的中心公转一圈。我们的太阳只不过是一颗寻常的平均大小的黄色恒星，处于银河系的一个螺旋臂的内缘附近。在亚里士多德和托勒密时代，人们认为地球是宇宙的中心。从那以后，我们的确已经走过了很长的历程！

直到1924年，当美国天文学家埃德温·哈勃证明了银河系不是仅有的星系，我们现代的宇宙图像才得以奠定。事实上，他找到了许多其他星系，它们之间是巨大的空虚的太空。为了证明这些，哈勃必须确定从地球到其他星系的距离。但是这些星系是如此之遥远，而不像邻近的恒星那样，它们的位置显得完全固定不动。由于哈勃不能使用视差法测量这些星系，他不得不利用间接的办法。恒星距离的一个显然的测度是它的光度。但是恒星的视亮度不仅依赖它的距离，还依赖它发射出多少光（它的光度）。一颗暗淡的恒星，如果足够近，将使任何远处星系中最亮的恒星相形见绌。所以，为了使用视亮度作为恒星距离的测度，我们必须知道它的发光度。

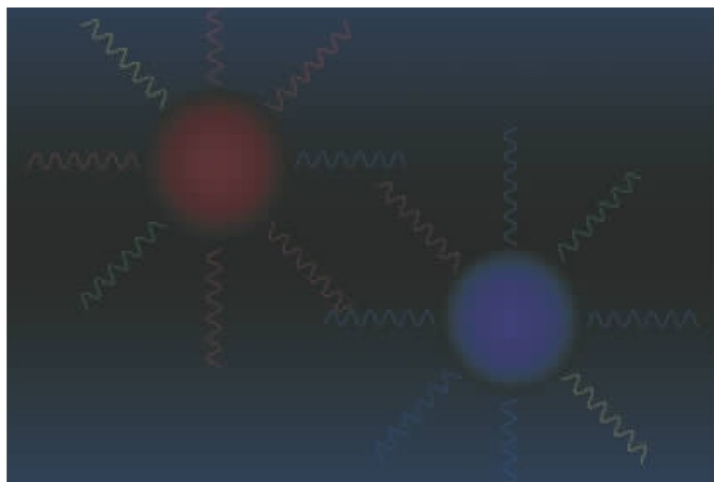
因为从邻近恒星的视差我们可以知道它们的距离，所以从它的视亮度可以计算出它的光度。哈勃注意到，按照这些邻近恒星发出的光的种类，可以将它们分成若干类型。同类的恒星总是具有相同的光度。然后他论证道，如果我们在一个遥远的星系中发现这些类型的恒星，我们可以假定它们具有与我们邻近的类似恒星相同的发光度。我们可以利用这些信息来计算出该星系的距离。如果我们可以对同一星系的一些恒星做这种处理，而且我们的计算总是给出相同的距离，我们就能相当确信自己的估计。哈勃用这种办法得出9个不同星系的距离。



恒星光谱

人们通过分析星光的组分色，既能确定恒星的温度，又能确定其大气成分。

今天我们知道，肉眼可见的恒星只占所有恒星的极小部分。我们能够看到大约55000颗恒星，这大约只占我们自身的星系即银河系中所有恒星的0.00001%。而银河系本身只不过是我们用现代望远镜能看到的多于10000亿个星系中的一个——而每个星系都平均包含大约10000亿颗恒星。如果一颗恒星是一粒盐，你可以把肉眼看得见的所有恒星全放在一个茶匙上，而宇宙中的所有恒星可以充满直径比8英里还长的一个球体。



黑体谱

由所有物体——不仅恒星——的微观成分的热运动导致物体发出辐射。这种辐射中的频率分布表征该物体的温度。

恒星是如此遥远，在我们的眼中它们只不过是微小的光点。我们不能看到它们的尺度或者形状。但是，正如哈勃注意到的，宇宙间存在很多不同种类的恒星，而我们可以按照它们的光的颜色将其区分。牛顿发现，如果太阳光通过一块称为棱镜的三角状玻璃，它就会分解成像在彩虹中一样的组分色。从一个给定光源发射出的各种颜色的相对强度称为它的光谱。人们把望远镜聚焦在单独的恒星或星系，就能观察到从该恒星或星系发来的光谱。

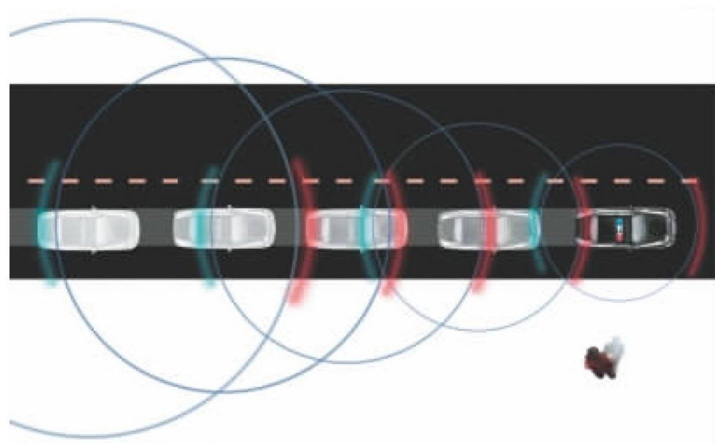
这个光告诉我们的诸事之一就是温度。1860年德国物理学家古斯塔夫·克希霍夫意识到，任何物体，比如恒星，加热时就会发出光或者其他辐射，正如煤炭加热时会发光一样。这种炽热物体中的原子的热运动引起发光，它称为黑体辐射（虽然炽热的物体不是黑的）。黑体辐射谱很容易辨识：它具有一个特殊的形状，这种形状随物体的温度而变化。因此，炽热物体发射的光像是一个温度读数。我们从不同恒星观测到的光谱总是恰好处于这种形式：它是该恒星热的状态的明信片。

如果我们更仔细地观测，从星光可以得到更多信息。我们发现某些非常特定的颜色缺失，而这些缺失的颜色可依恒星而变。由于我们知道每种化学元素吸收独具特点的一组非常特殊的颜色，把这些和在恒星光谱中缺失的那些相对照，我们就能精确地确定在那个恒星的大气中存在哪些元素。

20世纪20年代，当天文学家开始观测其他星系中的恒星光谱时，发现某些非常奇怪的东西：在那些星系中存在和我们自身星系中的恒星相同的缺失颜色的特征模式，只不过它们都向光谱的红端移动了同样的相对量。

物理学家将这种颜色或者频率的移动称为多普勒效应。大家在声音的领域里都对此非常熟悉。聆听路过的小轿车：当小轿车驶近时，它的发动机——或者它的喇叭——发出较高的音调，而在它通过再离去，它就发出较低的音调。它的发动机或者喇叭的声音是一个波，是一连串波峰和波谷。当一辆小轿车向我们急速开来，随着它发出每一个连续的波峰，它会越来越接近我们，这样波峰之间的距离——声音的波长——就比小轿车静止时短。波长越短，每秒到达我们耳朵的波动就越多，音调或者声音的频率也就越高。相应地，如果小轿车离开我们而去，波长就变得较长，而到达我们耳朵的波将具有较低的频率。小轿车运动越快，此效应就越大，这样我们可以利用多普勒效应去测量速度。光或者射电

波的行为很类似。警察就是利用多普勒效应，通过测量从小轿车反射回来的射电波脉冲的波长来测量它们的速度。



多普勒效应

当波源朝着观察者运动时，它的波长就显得较短。如果波源离开观察者运动，它的波长就显得较长。这就称做多普勒效应。

正如我们在第5章提到的，可见光的波长极短，其范围是百万分之四十厘米至百万分之八十厘米。光的不同波长正是人眼当做不同颜色看到的东西，最大的波长出现在光谱的红端，而最短的波长在蓝端。现在想象和我们距离不变的一个光源，比如一颗恒星，正在以一个不变的波长发射出光波。我们接收到的波的波长和它们被发射时的波长相同。然后假定光源开始离开我们而去。正如声音的情形那样，这意味着光的波长被拉长，因此，它的光谱向谱的红端移动。

哈勃在证明了其他星系存在之后的岁月里，花费时间为星系距离编目并观测其光谱。在那个时候，大多数人料想星系完全任意地运动，于是哈勃预料找到的蓝移谱会和红移谱一样多。因此，当他发现大多数星系呈现红移，确实感到非常惊奇：几乎所有星系都飞离我们！1929年哈勃发表的观测发现更令人惊奇：甚至星系红移的大小也不是任意的，它和星系离开我们的距离呈正比。换句话说，星系越远，则飞离得越快速！这意味着宇宙不像原先所有人以为的那样是静止的，或者在尺度上不变。事实上，宇宙正在膨胀，不同星系之间的距离一直在增长。

宇宙膨胀的发现是20世纪最伟大的智力革命之一。事后回想，人们很容易惊讶，为何前人从未想到这一点。牛顿和其他人应该可以意识

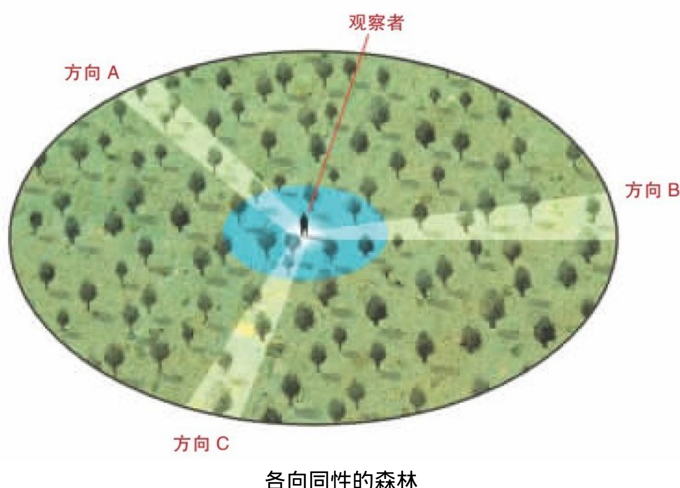
到，由于没有可相比较的斥力来平衡所有恒星和星系相互作用的引力拉力，一个静止的宇宙会是不稳定的。因此，即便宇宙在某一时刻是静止的，由于所有恒星和星系的相互引力吸引会很快使它收缩，所以它也不能保持静止。事实上，即便宇宙正在相当慢地膨胀，引力也会使它最终停止膨胀，然后它再开始收缩。然而，如果宇宙以超过某一临界速率膨胀，引力就永远不会强大到足以停止它，而它将继续永远膨胀下去。这有点像当你在地球表面向上方引燃火箭时发生的情景。如果火箭的速度相当慢，引力将最终使之停止并开始折回地面。另一方面，如果火箭的速度比某一临界值（大约每秒7英里）更高，引力就没有强大到足以将其拉回，这样它将永远飞离地球。

19世纪、18世纪甚至17世纪末的任何时候，人们都可以从牛顿引力论预言出宇宙的这个行为。然而，静态宇宙的信念是如此之根深蒂固，使它一直维持到20世纪的初叶。甚至爱因斯坦于1915年表述其广义相对论时，还如此坚信宇宙必须是静止的，他甚至在其方程中引进一个称做宇宙常数的敷衍因素，去修正他的理论，使宇宙可能处于静态。宇宙常数具有新的“反引力”的效应，它不像其他的力那样，不由任何特别的源引起，而是嵌入在时空的自身结构之中。这个新力的一个结果便是，时空具有一种内禀的膨胀倾向。爱因斯坦调节宇宙常数，就可以调节这种倾向的强度。他发现，他可以把它调节得恰好去平衡宇宙中的所有物体的相互吸引，这样就可以得到静态的宇宙。他后来否认宇宙常数，将这个敷衍因素称为他的“最大错误”。正如我们很快就要看到的，今天我们有理由相信，他引进宇宙常数也许终究是正确的。但是，爱因斯坦让静态宇宙的信念压倒他的理论似乎要预言的东西：宇宙正在膨胀，这肯定曾使他十分沮丧。似乎只有一个人愿意相信广义相对论的这个预言。当爱因斯坦和其他物理学家正在寻求避免广义相对论的非静止宇宙时，俄国物理学家兼数学家亚历山大·弗里德曼却着手解释它。

弗里德曼对于宇宙做了两个非常简单的假定：我们无论往哪个方向观察宇宙，也无论从任何其他地方观察宇宙，宇宙看起来都是一样的。弗里德曼证明，仅仅从这两个观念出发去解广义相对论的方程，我们应该预料到宇宙不是静止的。事实上，1922年，也就是在埃德温·哈勃做出发现的几年前，弗里德曼就预言了恰好是哈勃后来发现的东西！

很清楚，关于宇宙在任何方向上都显得一样的假设，在实际上不是准确成立的。例如，正如我们注意到的，我们星系中的其他恒星形成了

横贯夜空的叫做银河系的清晰光带。但是我们如果观看遥远的星系，似乎在每一方向上都有大致相同数量的星系。所以，假定我们在比星系间距离更大的尺度下来观察，而不理睬在小尺度下的差异，则宇宙确实在所有的方向上看起来是大致一样的。想象站在森林中，林中的树木随意分布。如果你往一个方向看，可能看到在1米距离处的最近的树。在另一方向最近的树也许在3米以外。在第三个方向你可以在2米处看到一簇树。森林似乎在每个方向上都显得不同，但是如果考虑在1英里半径之内的所有树木，这类差异就会被平均掉了，而你会发现，不管在哪个方向上，你看到的森林都是一样的。



各向同性的森林

即使森林中的树木均匀分布，邻近的树木仍然可以成簇。类似地，尽管宇宙在我们附近显得不均匀，但是在大尺度下，无论在我们视线的任何方向上，都显得是相同的。

在很长一段时期里，这种恒星的均匀分布已经充分地支持了弗里德曼假设——它可以看成是实在宇宙的粗略近似。然而，近世的一桩幸运的事件揭示了另一方面：事实上，弗里德曼假设异常准确地描述了我们的宇宙。1965年位于新泽西州的贝尔电话实验室的两个美国物理学家阿诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊正在试验一个非常灵敏的微波探测器。（提醒一下，微波正如光波，但是它的波长大约为1厘米。）彭齐亚斯和威尔逊发现其探测器接收到比应有的还要大的噪声，他们为此而困惑。他们在探测器上发现了鸟粪并检查了其他可能的故障，但很快就排除了这些可能性。这个噪声很特别，尽管地球围绕着自己的轴自转，而且围绕着太阳公转，这噪声白天晚上并且整年都是一样的。由于地球的自转和

公转使探测器指向空间的不同方向，于是彭齐亚斯和威尔逊得出结论，噪声来自太阳系之外，甚至来自银河系之外。它似乎从空间的每一方向同样地到来。现在我们知道，不管我们往哪个方向看，这个噪声变化总是非常微小，于是彭齐亚斯和威尔逊意外地发现了弗里德曼第一个假设的一个引人注意的例子，这个假设讲宇宙在每个方向上都是相同的。

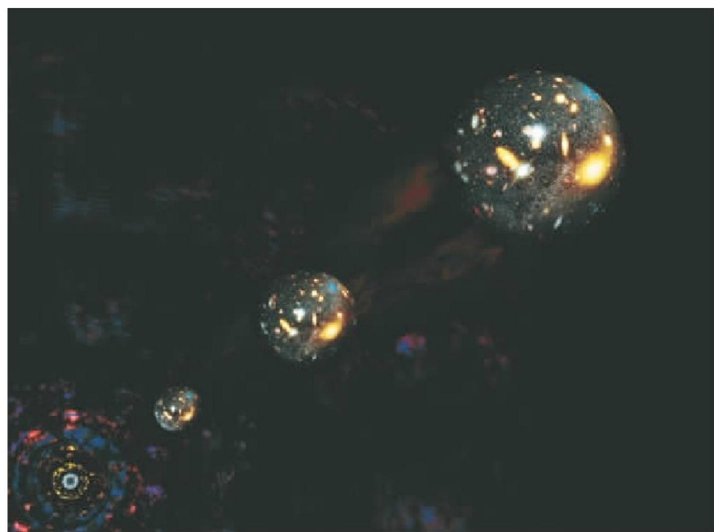
这个宇宙背景噪声的起源是什么呢？大致和彭齐亚斯及威尔逊研究他们检测器噪声的同时，在附近的普林斯顿大学的两位美国物理学家鲍伯·狄克和詹姆士·皮帕尔斯也对微波发生兴趣。他们正在研究乔治·伽莫夫（曾一度为亚历山大·弗里德曼的学生）的一个建议：早期的宇宙应该是非常密集的和白热的。狄克和皮帕尔斯论证道，我们仍然应该能看到早期宇宙的白热，这是因为从它非常遥远的部分发来的光，刚好现在才到达我们这里。然而，宇宙的膨胀意味着光被红移得这么厉害，以至于现在只能作为微波辐射，而非可见光呈现给我们。当彭齐亚斯和威尔逊听说狄克和皮帕尔斯的研究工作时，后者正准备着手寻找这个微波辐射，前者立即意识到，自己已经找到了这个辐射。为此，彭齐亚斯和威尔逊得到1978年的诺贝尔奖（狄克和皮帕尔斯似乎对此相当难过，更别提伽莫夫了）。

初看起来，宇宙在我们视线的任何方向上都显得相同，这一切证据似乎暗示，我们在宇宙中的位置有点特殊。特别是，如果我们看到所有其他的星系都远离我们而去，那么我们似乎必须处于宇宙的中心。然而，对此还可以做另外的解释：从任何其他星系上看，宇宙在任何方向上也可能都一样。正如我们所看到的，这是弗里德曼的第二个假设。

我们没有任何科学证据去支持或反驳弗里德曼的第二个假设。由于教会教义宣布我们在宇宙的中心占有一个独特的位置，所以若在几个世纪以前，这个假设就会被教会认为是异端邪说。但是今天我们之所以相信弗里德曼的假设，几乎基于相反的原因，即某种谦虚：我们觉得如果宇宙只是在围绕我们，而不在围绕宇宙其他点上的每个方向上都显得相同，那可就太令人吃惊了！

在弗里德曼的宇宙模型中，所有星系都直接相互飞离。这种情形很像画上许多斑点的被持续吹胀的气球。随着气球膨胀，任意两个斑点之间的距离增大，但是没有一个斑点可声称为膨胀的中心。此外，随着气球半径的持续增大，气球上的斑点相离得越远，则它们互相离开得越快。例如，假定气球的半径在1秒内加倍。原先相离1厘米的两个斑点现

在就相离2厘米（沿着气球表面来测量），这样它们的相对速度是每秒1厘米。另一方面，一对原先相离10厘米的斑点现在就相离20厘米，这样它们相对速度为每秒10厘米。类似地，在弗里德曼模型中任何两个星系互相离开的速度和它们之间的距离成正比。所以他预言，星系的红移应与离开我们的距离呈正比，这正是哈勃发现的。尽管弗里德曼成功地给出了他的模型，并且成功地预言了哈勃的观测，但是直到1935年，为了响应哈勃的宇宙均匀膨胀的发现，美国物理学家霍瓦德·罗伯逊和英国数学家阿瑟·瓦尔克提出类似的模型后，西方才普遍知道弗里德曼的工作。



膨胀气球宇宙

由于宇宙的膨胀，所有星系都相互离开。犹如正在吹胀的气球上的一些斑点，相对于相互邻近的星系，相互远离的星系之间的距离随时间增大得更快。因此，在任何星系上的观察者会觉得，越远的星系离开得越快。

弗里德曼只推导了宇宙的一个模型。但是如果他的假设是正确的话，爱因斯坦方程实际上可能有三种类型的解，也就是三种不同类型的弗里德曼模型——又是宇宙可能行为的三种不同方式。

在第一类（弗里德曼找到的）解中，宇宙膨胀得足够慢，这样不同星系之间的引力使膨胀减缓，并最终使之停止。然后星系开始朝着相互靠近的方向运动，而宇宙收缩。在第二类解中，宇宙膨胀得如此之快，以至于引力虽然能使之缓慢一些，却永远不能使之停止。最后，还有第三类解，宇宙的膨胀刚好快到足以避免坍缩。星系分开的速度越变越小，但是它永远不会完全达到零。

第一类弗里德曼模型引人注意的特点是，在该模型中，宇宙在空间上不是无限的，但是却没有边界。引力是如此之强大，把空间折弯绕回到自身。这和地球的表面很像，它是有限的，但是没有边界。如果你在地球表面上沿着一定的方向不停地行进，你将永远不会遇到一个不可超越的障碍，或者从边缘上掉下去，你最终会回到你出发的地方。在这个模型中，空间正与此相似，但是具有三维，而不像地球表面那样只具有二维。你可以直接绕宇宙走一周再回到出发点的思想，可成为科学幻想的好题材，但它在实际上没有多大意义。因为可以证明，你还没来得及绕回一圈，宇宙已经坍缩到了零尺度。宇宙是如此之大，你为了在宇宙终结之前回到你的出发点，就必须旅行得比光还快——而这是不允许的！在第二类弗里德曼模型中，空间也是弯曲的，虽然是以不同的方式。只有第三类弗里德曼模型对应于一个宇宙，其大尺度几何是平直的（尽管在大质量物体邻近，空间仍然是弯曲的或者翘曲的）。

哪一类弗里德曼模型描述我们的宇宙？宇宙最终将停止膨胀并开始收缩，或者将永远膨胀下去？

这个问题的答案比科学家们最初以为的还要复杂。最基础的分析依赖两件东西：宇宙现在的膨胀率和它现在的平均密度（在空间的给定体积内的物质的量）。现在的膨胀率越快，停止它所需要的引力就越大，这样需要的物质密度也就越大。如果平均密度比某一（由膨胀率所确定的）临界值还大，物质的引力吸引就将成功地停止其膨胀并使之坍缩——对应于第一类弗里德曼模型。如果平均密度比临界值小，就不存在足够的引力拉力去停止它膨胀，宇宙将永远地膨胀下去——对应于第二类弗里德曼模型。而如果平均密度刚好是临界值，那么宇宙将永远减缓它的膨胀，逐渐地越来越趋向，但永远不会达到一个静态的尺度，这对应于第三类弗里德曼模型。

那么我们的宇宙究竟是哪一类呢？我们利用多普勒效应测量其他星系离开我们的速度，就能确定现在的膨胀率。这可以非常精确地做到。然而，因为我们只能间接地测量这些星系的距离，所以它们测量得不很准确。于是，我们只不过知道，宇宙正在以每10亿年5%至10%的速率膨胀。我们关于宇宙现在的平均密度的不确定性甚至更大。即使我们把银河系和其他星系中能看到的所有恒星的质量加起来，甚至在对膨胀率取最低值的估计时，其质量总量仍然不及停止宇宙膨胀所需质量的1%。

但这还不是故事的全部。我们的星系和其他星系肯定还包含大量我

们不能直接观察到的“暗物质”。但是由于它对星系中恒星轨道的引力吸引的影响，我们知道它肯定存在。那些处于像银河系这样的螺旋星系的外围的恒星也许是最好的证据。这些恒星围绕着它们的星系公转得太快，如果仅仅依赖能看到的星系恒星的引力吸引，是不足以将其约束在轨道上。此外，人们还发现大多数星系是成团的，我们可以从星系团对星系运动的影响做类似的推断，在这些团中的星系之间还存在着更多的暗物质。事实上，在宇宙中暗物质的总量远远地超过平常物质的总量。当我们将所有这些暗物质加起来，我们大约只得到用来停止膨胀所需物质的量的1/10。但是也可能还存在几乎均匀地分布于整个宇宙的其他形式的暗物质，尚未被我们检测到，它们甚至可能更多地提高宇宙的平均密度。例如，存在一种叫做中微子的基本粒子，它和物质非常微弱地相互作用，而且去检测它非常困难（最近的一个中微子实验使用一个充满505000吨水的地下检测器）。过去以为中微子是无质量的，因此没有引力吸引，但是最近几年的实验表明中微子实际上具有非常微小的质量，该质量在早先没有被检测到。如果中微子具有质量，它们可以是暗物质的一种形式。即使允许中微子暗物质，宇宙中的物质仍然远比停止膨胀需要的少得多。于是，直到最近，大多数物理学家本来要达成共识：第二类弗里德曼模型是适用的。

后来又有了一些新的观测。最近几年，几个研究小组研究了彭齐亚斯和威尔逊发现的背景微波辐射中的微小起伏。那些起伏的尺度可用来作为宇宙大尺度几何的指示物，它们指出宇宙根本是平坦的（正如在第三类弗里德曼模型中那样）！由于似乎没有足够的物质和暗物质对此做出解释，物理学家为了解释它，假定存在另一种还未被探测到的实体——暗能量。

使事情更进一步变复杂的是，最近的其他观测指出，宇宙的膨胀实际上不是减慢，而是加速。弗里德曼模型中没有一类做到这一点！这是非常奇怪的，因为空间中的物质效应，不管其密度高低，只能减缓膨胀，引力毕竟是吸引的。宇宙膨胀正在加速，这有点像一个炸弹的爆炸，这种炸弹在爆炸后它的威力不但没有耗散，反而得到加强。越来越快地把宇宙分离开的原因可能是什么力呢？没有人清楚，但是它也许证明，爱因斯坦引进宇宙常数（以及它的反引力效应）终归是正确的。

随着新技术和新的卫星携带的大型望远镜的快速发展，我们正快速地得到新的令人惊讶的宇宙知识。现在我们已对它的晚期行为甚为了

解：宇宙将继续以不断增加的速度膨胀。至少对于那些足够谨慎而不落进黑洞的人们，时间将永远流逝。但是非常早期的情形如何呢？宇宙是如何起始的，又是什么使它膨胀呢？

·第8章·

大爆炸、黑洞和宇宙的演化

在第一类弗里德曼宇宙模型中，第四维，时间——正如空间一样——在范围上是有限的。它正如一根具有两个端点或边界的线。因此时间具有终结，而且它也有一个开端。事实上，在宇宙具有我们观测到的物质总量的情形下，由爱因斯坦方程得出的所有解中，都有一个非常重要的特征：在过去的某一时刻（大约137亿年以前）相邻星系之间的距离必须为零。换言之，整个宇宙被挤压在零尺度的单独的一点，就像一个半径为零的球。那时，宇宙的密度和时空曲率都为无限大。它是我们称做大爆炸的时刻。

我们所有的宇宙学理论都是在时空是光滑和几乎平坦的假设这个基础上表述的。这就意味着，我们所有的理论都在大爆炸处崩溃了：把具有无限曲率的时空叫做几乎平坦的，肯定是荒谬的！因为可预见性在大爆炸处失效了，因此即便在大爆炸之前存在事件，我们也不能用它们来确定以后会发生什么。

相应地，事实也正是如此，如果我们只知道大爆炸之后发生的事，我们就不能确定在它之前发生了什么。就我们而言，在大爆炸之前的事件没有后果，所以不应成为宇宙科学模型的一部分。因此，我们应该从模型中把它们割除，并且声称大爆炸是时间的起始。这意味着诸如谁为大爆炸设立条件的问题不是科学要过问的问题。

如果宇宙具有零尺度，还引起了另一种无限大，即温度的无限大。在大爆炸本身，宇宙被认为无限热。随着宇宙的膨胀，辐射的温度减

小。由于温度就是粒子平均能量——或者速度的测度，宇宙的这个冷却对其中的物质就有重大的影响。在非常高的温度下，粒子会运动得快到使它们能够逃逸核力或电磁力所引起的任何相互吸引，但是随着它们的冷却，我们可以预料相互吸引的粒子开始聚集成堆。甚至在宇宙中存在的粒子的种类也依赖宇宙的温度，并由此依赖宇宙的年龄。

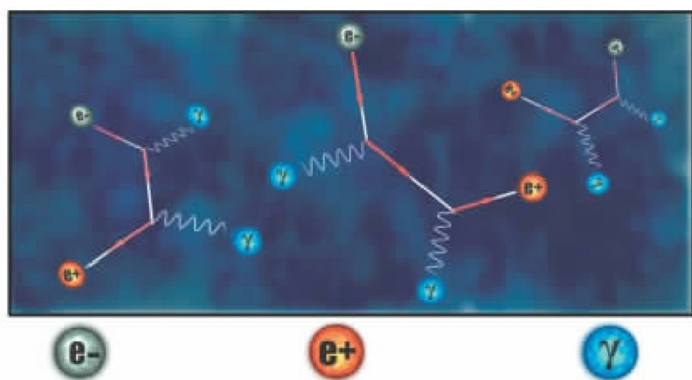
亚里士多德相信物质不是由粒子构成的。他相信物质是连续的。也就是说，根据他的看法，一块物体可以被无限地分割成越来越小的小块：永远不存在不能被进一步分割的物质颗粒。然而，一些希腊人，比如德谟克里特认为物质本性上是颗粒性的，所有东西都是由大量的各种不同种类的原子组成的。（原子这个词在希腊文中意思是“不可分的”。）现在我们知道——至少在我们的环境中，以及在宇宙的现在状态中，这是对的。但是我们宇宙的原子并不是一直存在的，它们不是不可分的，而且它们只代表了宇宙中粒子种类的小部分。

原子由更小的粒子：电子、质子和中子组成。质子和中子本身又由更小的称为夸克的粒子组成。此外，对应于这些次原子粒子的每一种都有一种反粒子存在。反粒子具有和同胞粒子相同的质量，但是它们的电荷和其他属性均相反。例如，电子的反粒子称做正电子，它具有正电荷，也就是和电子电荷相反。可能还有由反粒子构成的整个反世界和反人存在。然而，当反粒子和粒子相遇时，它们相互湮灭。这样，如果你遭遇上你的反自身，千万不要握手——你们俩会在一次巨大的闪光中消灭殆尽！

光能以另一类粒子，称做光子的无质量粒子的形式参与进来。邻近的太阳核反应炉对地球而言是最大的光子源。太阳还是另一种粒子，即前面提到的中微子（和反中微子）的巨大源泉。但是这些极轻的粒子几乎从来不和物质相互作用，因此它们穿透我们而毫无效应，其速率是每秒几十亿颗。物理学家总共已经发现了几十种这类基本粒子。在岁月的流逝中，随着宇宙经历的复杂演化，这个粒子家族的组成也在时间中演化。正是由于这种演化，类似地球的行星和诸如我们这样的生命才能够存在。

大爆炸后的1秒，宇宙已经膨胀到足以使温度降到大约100亿摄氏度。这大约是太阳中心温度的10000倍，但是氢弹爆炸能达到这么高的温度。这时宇宙主要包含光子、电子和中微子以及它们的反粒子，还有一些质子和中子。这些粒子曾经有过这么大的能量，当它们碰撞时，会

产生许多不同的粒子/反粒子对。例如，碰撞的光子会产生一个电子和它的反粒子，即正电子。这些新产生的粒子中的一些会与反粒子同胞相碰撞并且湮灭。只要电子与正电子相遇，它们就要湮灭，但是相反过程却没有这么容易：为了让两个诸如光子的无质量粒子去创生诸如电子和正电子的一对粒子/反粒子，该碰撞的无质量粒子必须具有确定的最小能量。那是因为一个电子和正电子具有质量，而这新创生的质量必须来自碰撞粒子的能量。随着宇宙继续膨胀以及温度继续下降，发生能量大到足以创生电子/正电子对的碰撞不如电子/正电子对湮灭那么频繁。因此，大多数电子和正电子最终会相互湮灭，产生更多光子，只余下相对少的电子。另一方面，中微子和反中微子与自己以及与其他粒子之间只能非常微弱地相互作用，所以它们几乎不会这么快地相互湮灭，它们今天应当仍然留在周围。如果我们能够观测到它们，那将为这幅宇宙极热早期阶段的图像提供很好的检验。但是不幸的是，在100多亿年之后的现在，它们的能量实在太低了，低到我们无法直接观察到（尽管我们也许能间接地检测到）。



光子/电子/正电子的平衡

在早期宇宙中，存在电子/正电子对碰撞创生光子和相反过程之间的平衡。随着宇宙温度下降，这种平衡变得对创生光子有利。宇宙中的大多数电子和正电子最终会相互湮灭，只余下相对少的电子存在至今。

大爆炸后大约100秒，宇宙的温度降到10亿摄氏度，也就是最热恒星的内部温度。在这个温度下，一个称为强力的力起了重要的作用。我们将要在第11章里更加仔细讨论的这种强力，是一种短程的吸引力，它把质子和中子相互捆绑在一起而形成核。在足够高的温度下，质子和中子具有足够高的运动能量（见第5章），使它们能从相互碰撞中自由独立地出现。但是在十几亿摄氏度下，它们不再有足以克服强力吸引的能量，而开始结合在一起，产生氘（重氢）原子核，氘核包含一个质子和

一个中子。然后，氘核会再与更多的质子和中子结合形成氦核，氦核包含两个质子和两个中子，还有少量的一对更重的元素，锂和铍。人们可以计算出，在热大爆炸模型中大约1/4的质子和中子转变成氦核，还有少量的重氢和其他元素。而遗留下的中子会衰变成质子，这是通常氢原子的核。

1948年，在一篇和他的学生拉夫·阿尔法合作的著名的论文中，科学家乔治·伽莫夫（见53页）提出了宇宙热的早期阶段的这个图像。伽莫夫颇为幽默——他说服核物理学家汉斯·贝特将他的名字加到这篇论文上面，使得列名作者为阿尔法、贝特、伽莫夫，正如希腊字母的前三个：阿尔法、贝他、伽马，这对于一篇有关宇宙开初的论文特别适合！他们在这篇论文中做出了一个惊人的预言：来自宇宙非常热的早期阶段的（以光子形式的）辐射今天还应该在周围存在，但是它的温度已降低到只比绝对零度高几摄氏度。（当物质处于绝对零度即-273摄氏度时，不包含任何热能，因此它是可能的最低温度。）

这正是彭齐亚斯和威尔逊在1965年发现的微波辐射。在阿尔法、贝特和伽莫夫写他们的论文时，对于质子和中子的核反应了解得不多。所以对于早期宇宙不同元素比例所做的预言相当不准确，但是按照更好的知识重新进行这些计算之后，现在和我们的观测非常符合。况且，去解释为何宇宙大约1/4质量处于氦的形式，用任何其他方法都是非常困难的。

但是这个图像存在问题。在热大爆炸模型中，热在极早的宇宙中来不及从一个区域流到另一个区域。这意味着要想解释微波背景在我们观测的任一方向上都具有相同温度的事实，宇宙的初始状态一定曾经是处处温度都完全相等。此外，其初始的膨胀率也必须选取得这么精确，使得现在的膨胀率仍然这么接近于避免坍缩所需要的临界值。除了把它作为上帝想要创造像我们这样的生灵所采取的举动之外，解释宇宙为何恰好以这个方式起始是非常困难的。为了试图寻找一个能够从许多不同的初始结构演化成像现在宇宙这样的一个模型，麻省理工学院的科学家阿伦·固斯提出，早期宇宙可能经历过一个非常快速膨胀的时期。这个膨胀叫做暴胀，这意思是说，宇宙在一段时间里以增加的速率膨胀。按照固斯的说法，在远远小于1秒的时间里，宇宙的半径增大了100万亿亿亿（1后面跟30个零）倍。宇宙中的任何不规则性都被这种膨胀抹平，正如当你吹胀气球时，它上面的皱纹就被抹平了。暴胀以这种方式解释了

宇宙现在光滑均匀的状态是如何由许多不同的非均匀的初始状态演化而来的。因此，我们的图像至少在回到大爆炸后的十万亿亿亿亿亿分之一秒时仍然正确，对此我们有相当的把握。

在初始的这一切混乱之后，只在大爆炸后的几个钟头内，氦以及其他某些诸如锂等元素的产生就停止了。此后的100万年左右，宇宙仅仅继续膨胀，并没有发生太多的事。最终，一旦温度下降到几千摄氏度，电子和核将不再有足够的运动能量去克服它们之间的电磁吸引，它们就会开始结合形成原子。宇宙整体继续膨胀和冷却，但是在比平均密度稍微密集的区域，额外的引力吸引使膨胀缓慢下来。

这种吸引最终会使某些区域停止膨胀并开始坍缩。随着它们的坍缩，这些区域外的物质的引力拉力可能使它们开始稍微旋转。随着坍缩区域变得更小，它会自转得更快——正如在冰上旋转的滑冰者，当他们缩回手臂时会旋转得更快。最终，当这个区域变得足够小，它会旋转得快到足以平衡引力的吸引，碟状的旋转星系就以这种方式诞生了。其他碰巧没有得到旋转的一些区域，就会形成称为椭圆星系的椭球状物体。在这些星系中，因为星系的个别部分稳定地围绕着它的中心旋转，所以区域停止坍缩，但星系整体并不旋转。

随着时间的流逝，星系中的氢气和氦气被分割成更小的星云，它们在自身引力下坍缩。当它们收缩时，它们中的原子相互碰撞，气体的温度升高，直到最后热得足以起始核聚变反应。这些反应将氢转变成更多的氦。正是这个类似于受控的氢弹爆炸的反应所释放的热使恒星发光。这一附加的热也增大了气体的压力，直至足以平衡引力的吸引，从而气体停止收缩。星云以这种方式合并成类似我们太阳的恒星，把氢燃烧成氦，并且将产生的能量作为热和光辐射出来。这有点像气球——在试图使气球膨胀的内部空气压力和试图使气球缩小的橡皮张力之间有一个平衡。

热气体云一旦合并成恒星，核反应产生的热和引力吸引相平衡，恒星会稳定地维持很长的时间。然而，恒星最终会耗尽它的氢和其他核燃料。恒星初始的燃料越多，它则会越快燃尽。这的确似非而是，因为恒星的质量越大，为了平衡引力它就必须越热；而恒星越热，核聚变反应就越快，也就越快耗尽它的燃料。我们的太阳很可能有足够再维持50亿年左右的燃料，但是质量更大的恒星却可在1亿年这么短的时间内耗尽燃料，这可比宇宙的年龄短多了。

当恒星耗尽了燃料，它开始变冷，而引力占优势使它收缩。这一收缩把原子挤到一起，并使恒星再次变得更热。随着恒星进一步变热，它开始把氦转变成像碳和氧那样更重的元素。然而，这并没有释放出更多得多的能量，于是，危机就要发生了。我们不完全清楚下一步会发生什么，但是看来很可能恒星的中心区域会坍缩成一个非常紧密的状态，诸如黑洞。“黑洞”这个术语是非常近期才出现的，它是1969年美国科学家约翰·惠勒为了形象地描述一个观念时杜撰的名字。这个观念至少可回溯到200年前，那个时候共有两种光的理论：牛顿赞成其中一种，光由粒子组成，另一种是光由波构成。现在我们知道，实际上这两者都是正确的。正如我们将在第9章中看到的，由于量子力学的波粒二象性，光既可被认做波，也可被认做粒子。描述词波和粒子是人类创造的概念，自然没有必要遵照这些概念，把所有现象都非此即彼地归入其中的一个种类！

在光由波构成的理论中，我们不清楚光对引力的反应如何。但是如果认为光是由粒子组成的，我们可以预料，那些粒子正如炮弹、火箭和行星一样，以相同的方式受引力影响。特别是，如果你从地球——或者恒星——的表面向上发射出一个炮弹（正如50页的火箭），除非其向上起始的速度超过某个值，否则它最终将会停止，然后返回。这个最小的速度称为逃逸速度。一个恒星的逃逸速度依赖于它的引力拉力的强度，恒星的质量越大，其逃逸速度就越大。起先人们认为，光粒子无限快地运动，这样引力不能够使它们缓慢下来，但是罗默对光以有限速度行进的发现意味着，引力可能具有重要的效应：如果恒星质量足够大，光的速度将小于恒星的逃逸速度，那么所有从恒星发射出来的光都将返落回去。1783年，在这个假定的基础上，剑桥的学监约翰·米歇尔在《伦敦皇家学会哲学学报》上发表了一篇文章。他指出，一个质量足够大，并且足够紧致的恒星可能具有如此强大的引力场，以至于连光线都不能逃逸。任何从恒星表面发出的光，还没到达非常远的距离即被恒星的引力吸引拉曳回来。这样的物体就是我们现在称做黑洞的东西，因为那是名副其实的：空间中的黑的空洞。

几年后，法国科学家拉普拉斯侯爵提出了一个类似的观念，他的论断显然独立于米歇尔。有趣的是，拉普拉斯只将此观念纳入他的《世界系统》一书的第一版和第二版中，而在以后的版本中将其删除。也许他认定这是一个愚蠢的观念——因为在19世纪利用波理论似乎就能解释一切，光的微粒说变得不时兴了。事实上，因为光速是固定的，所以在牛

顿引力论中，将光类似炮弹那样处理并不真正协调。从地面发射上天的炮弹由于引力而减速，最后停止并折回；然而，一个光子必须以不变的速度向上继续运动。直到1915年爱因斯坦提出广义相对论之前，一直没有关于引力如何影响光的协调理论，而且直到1939年，一位年轻的美国人罗伯特·奥本海默，根据广义相对论，才首先解决了理解大质量恒星会发生什么的问题。

现在，从奥本海默的工作中，我们得到如下的图像。恒星的引力场改变了光线通过时空的路径，使之和原先没有恒星情况下的路径不一样。这正是当日食发生时，从远处恒星来的光线的弯曲中观测到的效应。在恒星表面附近，光线在空间和时间中的轨道稍微向内弯曲。随着恒星收缩，它变得更密集，这样在它的表面上引力场变得更强大。（你可以认为引力场是从恒星的中心点出来的；随着恒星收缩，它表面上的点越来越靠近中心，这样它们感受到更强大的场。）越强大的场使在表面附近的光线路径向内弯曲越甚。最终，当恒星收缩到某一临界半径时，表面上的引力场变得这么强大，将光线路径向内弯曲得这么厉害，以至于光不再能够逃逸。

根据相对性理论，没有东西运动得比光还快。这样，如果光都逃逸不出去，其他东西也不可能逃逸；任何东西都被引力场拉回去。坍缩的恒星形成一个围绕它的时空区域，不可能从那里逃逸而到达远处的观察者。这个区域就是黑洞。黑洞的外边界称做事件视界。今天，多谢哈勃空间望远镜和其他专注于X射线和伽马射线而非可见光的其他望远镜，我们知道黑洞乃是普通现象——比人们原先以为的要普通得多。一颗卫星只在一个小天区里就发现了11500个黑洞。我们还在我们星系的中心发现了一个黑洞，其质量比100万个太阳的质量还要大。那个超重的黑洞有一个围绕着它以大约2%光速公转的恒星，其速度比一颗围绕着原子核公转的电子的平均速度还快！



高于或低于逃逸速度的炮弹

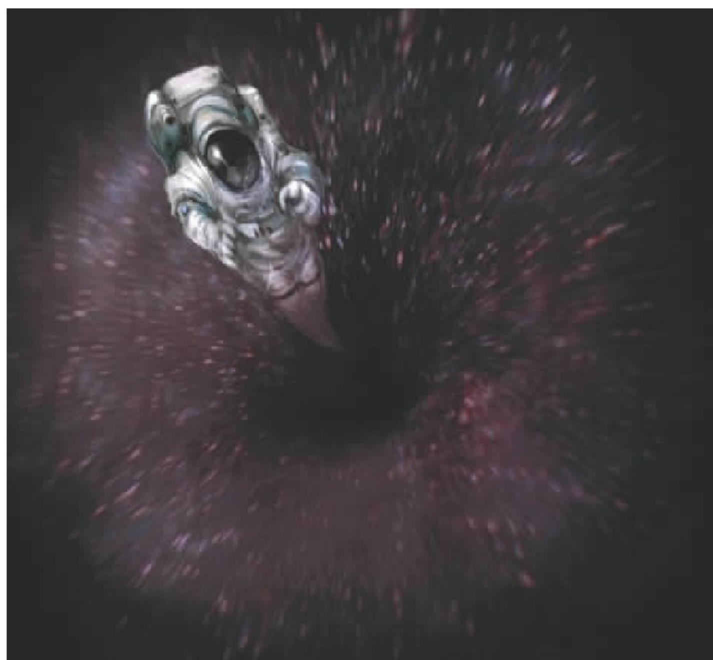
如果向上发射的物体比逃逸速度还快，它就未必落回。

为了理解你凝视一个大质量恒星坍缩形成黑洞时出现的景象，必须记住在广义相对论中不存在绝对时间。换言之，每位观察者都有他自己的时间测度。因为在恒星表面上的引力场更强，所以在恒星表面上的某人和在远处的某人的时间流逝是不同的。

设想在正在坍缩的恒星表面上有一位无畏的航天员，当恒星向内坍缩时他留在星球表面上。在他的手表的某一时刻——比如讲11：00——恒星收缩到临界半径以下，此时引力场变得这么强，以至于没有任何东西可以逃逸出去。现在假定他的指令是按照他的手表每一秒发送一个信号到上方的一个宇宙飞船上，后者在离开恒星中心的某一固定距离上公转。他开始在10：59：58，也就是比11：00早2秒开始传送，他在宇宙飞船上的同伴会记录到什么呢？

我们从早先的搭乘火箭飞船理想实验中得知，引力使时间变得缓慢，而且引力越强，则效应越大。在恒星上的航天员比他在轨道上的同伴们处于更强的引力场中，这样对他而言的1秒按照他同伴们的手表要比1秒长久。而且随着他乘坐的恒星向内坍缩，他感受的场会变得越来越强，这样宇宙飞船上的那些人觉得，从他来的信号间隔显得越来越长。这种时间的拉长在10：59：59之前是非常微小的，于是，在轨道上公转的航天员们，为了接收航天员，按照他的表，分别在10：59：58和10：59：59发出的信号，只需等待比1秒稍长的时间。但是，轨道上的航天员们必须无限久地等待11：00的信号。

所有发生于恒星表面上在10：59：59和11：00（按照航天员的手表）之间的每件事情，在宇宙飞船看来，都被散开到一个无限的时期。当接近11：00时，从恒星出发的任何光的接续的波峰和波谷之间的到达时间间隔会变得越来越长，正如同从航天员来的信号之间的间隔一样。由于光的频率是以每秒波峰和波谷的数目来测度的，对于在宇宙飞船上的那些人，恒星来的光频率显得越来越低。这样，它的光会显得越来越红（也越来越淡）。最终，该恒星变得这么黯淡，以至于在宇宙飞船上再也看不见它了：所余下的一切便是空间中的一个黑洞。可是，该恒星仍然将同样的引力继续作用到宇宙飞船上，使飞船继续公转。



潮汐力

因为引力随距离减弱，由于你脚部比头部离地球中心近1～2米，地球对你的头部的拉力小于脚部受到的拉力。我们觉察不到这么小的差别。但是在黑洞表面附近的航天员肯定会被撕裂。

然而，由于以下的问题，这个场景不是完全现实的。你离开恒星越远则引力越弱，这样在我们无畏的航天员脚上的引力总是比在他头上的力更大。在恒星收缩到临界半径并在那里形成事件视界之前，这种力的差异就足以把他拉伸得像意大利面条一样或者撕裂。然而，我们相信在宇宙中存在大得多的物体，例如在一些星系的中心区域，它们也能遭受引力坍缩而产生黑洞，正如在我们星系中心的超大质量黑洞。在这样的

一个物体上，在形成黑洞之前，航天员不会被撕开。事实上，当他到达临界半径时没有觉察到任何特殊之处，甚至他能够不知不觉地通过这一永不回返之点——尽管对于在外面的那些人，他的信号变得越来越稀疏，直至最终停止。而随着区域继续坍缩，仅仅在（由航天员测量的）几个小时之内，他头上和脚上的引力的差别就会变得这么强大，又会将他撕裂。

当一个质量非常大的恒星坍缩时，恒星的外部区域有时会在一次称做超新星的极大的爆发中被刮跑。超新星爆发是如此之巨大，它发出的光可以比它所在的星系中所有其他恒星合并在一起发出的光还要多。我们看到的蟹状星云便是超新星爆发一例的残余。1054年中国人对此做了记载。虽然爆发的恒星在54000光年之遥，但在数月的时间里仍可被肉眼看到，它是这么耀眼，甚至白天都能看到，夜里可以借它看书。500光年之遥的超新星——1/10那么远——将会亮100倍，并且真的可将黑夜变成白昼。为了理解这种爆发的猛烈，只要考虑到，尽管它比太阳（回忆一下，我们的太阳位于8光分的邻近距离上）远几千万倍，它的光仍然可以和太阳相匹敌。如果超新星发生得足够近，虽然地球可以安然无恙，但它仍然发射出足以使所有生物致命的辐射。事实上，最近有人还提出，上新世和更新世过渡期的大约200万年前，发生过海洋生物的灭绝，它是由邻近的称做天蝎-半人马星协的星团中超新星宇宙线辐射导致的。一些科学家相信，因为在星系中恒星密集的区域，诸如超新星之类的现象甚为普遍，足以在所有生命演化的起始就将它们定期扑灭。所以，高级生命只可能在没有太多恒星的区域——“生命带”——中演化。在宇宙中每天平均有成千上万次超新星在某处爆发。在任何特定的星系中超新星大约每一世纪发生一次，但这仅仅是平均。可惜的是——至少对于天文学家而言——在银河系中上一回有记录的超新星发生于1604年，是在望远镜发明之前。

在我们星系中，有一颗被称为仙后座ρ星，它是我们星系中下一次超新星爆发的最重要候选者。幸运的是，它是安全无忧的，距我们有10ρ000光年的距离。它属于称为黄特超巨星类型的恒星，只是在银河系中已知的7个黄特超巨星中的一个。1993年一支国际天文学家队伍开始研究这个恒星。在他们后来观测的几年间，这个恒星经历了几百摄氏度的周期性温度起伏。在2000年夏天，它的温度忽然从7ρ000摄氏度左右快速降至4ρ000摄氏度。在这一期间，天文学家们还在恒星大气层测到氧化钛，他们相信这是被巨大的冲击波从恒星抛出的外层的一部分。

在超新星中，在接近恒星生命终点时产生的某些重元素被摔回到星系中，并为下一代恒星提供一些原料。我们的太阳就包含大约2%的这些重元素。它是第二或第三代恒星，在大约50亿年前由包含更早的超新星残骸的旋转气体云形成的。云中的大部分气体形成了太阳或者喷到外面去，但是少量的重元素集聚在一起，形成了现在像地球这样的，作为行星围绕太阳公转的物体。我们首饰上的金以及我们核反应堆中的铀，都是在我们太阳系诞生之前发生的超新星的残余！

当地球刚刚凝聚时，它非常热并且没有大气。它在时间的长河中冷却下来，并从岩石中逸出的气体里获得大气。我们不能够在这个初始的大气中存活。它不包含氧气，但它肯定包含大量对我们有毒的其他气体，例如硫化氢（也就是臭鸡蛋发出的难闻的气体）。然而，那时就存在着能在这种条件下繁衍的其他原始生命的形式。人们认为，它们可能是原子的偶然结合，形成叫做宏观分子的大结构的结果，而在海洋中发展，这种结构能将海洋中的其他原子聚集成类似的结构。它们就这样自我复制而繁殖。在有些情况下复制中有误差，这些误差大多数使得新的宏观分子不能自我复制并最终被消灭。然而，有一些误差会产生出新的宏观分子，它们甚至会更有效地复制自己。所以它们具有优势，并趋向于取代原先的宏观分子。进化的过程就是以这种方式开始，进化导致越来越复杂的自我复制有机体的发展。第一种原始的生命形式消化了包括硫化氢在内的不同物质而释放氧气，这就逐渐地将大气改变到今天这样的成分，并允许诸如鱼、爬行动物、哺乳动物以及最终像人类这样的高级生命形式的发展。

20世纪见证了人类宇宙观的转变：我们意识到，我们自己的行星在广袤的宇宙中是微不足道的，而且我们发现时间和空间是弯曲的，是不可分离的，宇宙正在膨胀，而且它在时间中有一开端。

宇宙从非常热的状态起始，并随着膨胀而冷却的这一图景是基于爱因斯坦的引力论，即广义相对论，它和我们今天得到的所有观测证据都相符合，这是该理论的伟大胜利。然而，由于该理论预言了，宇宙从大爆炸，也就是当它的密度和时空的曲率都为无限大的时刻起始，而数学不能完全应付无穷大的数，所以广义相对论预言了在宇宙中存在一点，在那里，理论本身崩溃或者失败了。这样的点正是数学家称之为奇点的一个例子。当一个理论预言诸如无限密度和曲率的奇点时，这是一个征兆，说明该理论必须做某种修正。因为广义相对论不能告诉我们宇宙是

如何起始的，所以它是一个不完备的理论。

除了广义相对论，20世纪还孕育了自然的另一个伟大的部分理论——量子力学。那个理论处理发生在非常小尺度下的现象。我们的大爆炸图景告诉我们，在极早期宇宙有过一个时刻，那时宇宙如此之小，甚至在研究它的大尺度结构时，人们不能够再无视量子力学的小尺度效应。我们在下一章将会看到，把这两个部分理论结合成一个单独的量子引力论，激起我们一个伟大的抱负，去完全理解宇宙自始至终的全过程。在量子引力论中，通常的科学定律在所有地方，也包括在时间的开端处都成立，没有必要存在任何奇点。

·第9章·

量子引力

科学理论，尤其是牛顿引力论的成功，使拉普拉斯侯爵在19世纪初就论证道，宇宙完全是决定论的。拉普拉斯相信应该存在一族科学定律，它们——至少在原则上——允许我们预言会在宇宙中发生的每一件事物。这些定律需要的输入仅仅是宇宙在任意一个时刻的完整状态。这被称为初始条件或者边界条件（边界可指空间或时间中的边界；空间中的边界条件是宇宙在它的外边界——如果它有一个的话——的状态）。拉普拉斯相信，基于完整的一族定律，以及适当的初始或边界条件，我们应能计算出宇宙在任意时刻的完整的状态。

需要初始条件凭直觉也许是显而易见的：现在的不同状态将明显地导致将来的不同状态。在空间中对边界条件的需求略微微妙些，但原则上是一样的。一般而言，作为物理理论基础的方程具有很不相同的解，而你必须依赖初始或者边界条件去决定哪些解适用。它就有点像你的银行账户有大数额的进账和出账，你最后以破产还是富有告终，不仅由你进账和出账的总额，还由一开始在账户中有多少钱的边界或者初始条件决定。

如果拉普拉斯是正确的，那么依照宇宙现在的状态，这些定律就会告诉我们宇宙无论在将来还是在过去所处的状态。例如，给定太阳和行星的位置和速度，我们就能用牛顿定律计算出太阳系在任何更晚或更早时刻的状态。对行星来说，决定论似乎是相当明显的——毕竟天文学家能非常精确地预言诸如日食、月食等事件。但是拉普拉斯走得更远，他假定存在类似的定律，这些定律制约其他任何事物，也包括人类行为。

科学家在未来真的可能计算出我们所有的行动吗？1杯水包含比10的24次方（1后面跟24个零）个更多的分子。实际上，我们永远别想知道其中的每个分子的状态，这比宇宙的甚至比我们身体的完整的状态要简单得多。然而说宇宙是决定论的，这指的是，纵然我们没有智能去进行计算，我们的未来仍然是被预先决定的。

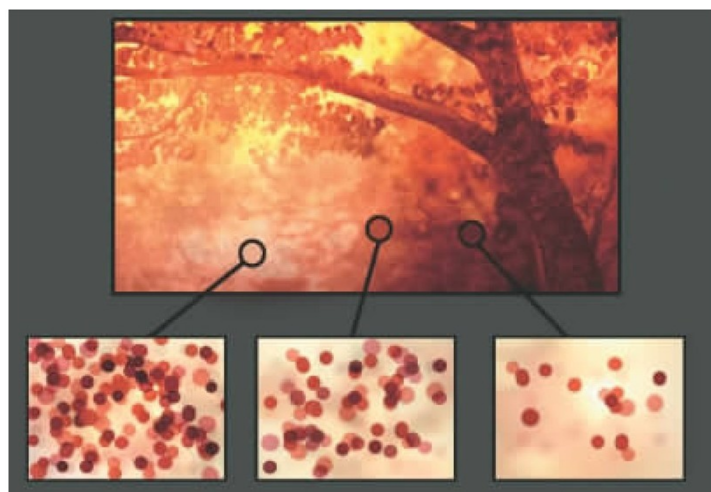
许多人强烈抵制科学决定论的这条教义，他们觉得它触犯了上帝随心所欲驾驭世界的自由。但是直到20世纪的早期，这一直是科学的标准假定。当英国科学家瑞利勋爵和詹姆斯·金斯爵士计算了诸如恒星的热物体应该发射的黑体辐射的总量时（正如在第7章中提到的，任何物体被加热时都会发出黑体辐射），出现了必须抛弃上述信条的最初征兆之一。

根据那时我们相信的定律，一个热体必须在所有频率上同等地发出电磁波。倘若果真如此，那么它会在可见光谱的每种颜色，以及微波、射电波、X射线等所有频率发射出相等的能量。回忆一下，波的频率是每秒上下振荡的次数，也就是每秒波动的数目。一个热体在所有频率上同等地发射波，在数学上意味着，它在每秒0次波动与每秒1X000X000次波动之间，和在每秒1X000X000次波动与每秒2X000X000次波动之间，和在每秒2X000X000次波动至每秒3X000X000次波动之间，等等，直至无穷，都发出相同的能量。让我们把频率在每秒0次波动至每秒110001000次波动之间，以及在每秒110001000次波动至每秒210001000次波动之间等的波发射出的能量作为一个单位。那么在所有频率上发射出的总能量就是1加1加1，一直继续下去的总和。由于在一个波中每秒波动的数目是没有限度的，所以能量的和是一个没有终结的和。根据这个推理，发射的总能量应是无限大。

为了避免这个显然荒谬的结果，德国科学家马克斯·普朗克在1900年提出，光、X射线以及其他电磁波只能发出一定的分立的波包，他把这种波包称做量子。正如在第8章中提到过的，我们今天把光的一个量子叫做光子。光频率越高，它所含能量越大。因此，尽管任意给定颜色或频率的光子都是等同的，但根据普朗克理论，不同频率的光子携带不同能量。这意味着在量子论中，任何给定颜色的最黯淡的光——一个单独光子携带的光——具有依赖其颜色的能量含量。例如，由于紫光频率是红光频率的2倍，一个紫光量子的能量含量为红光量子的2倍。这样，紫光能量最小量是红光能量最小量的2倍。

这个理论如何解决黑体问题呢？一个黑体在任何给定频率上发射电磁能的最小量是那个频率的一个光子所携带的，在较高的频率上光子的能量较大。于是，黑体在较高频率上能发射的最小能量较高。在足够高的频率上，甚至一个单个量子的能量都比一个物体所拥有的能量还要多，在这种情形下没有光可供发射，这就终结了原先不可终结的总和。这样，在普朗克理论中，高频的辐射被减小，物体损失能量的速率就变成有限的，从而解决了黑体问题。

量子假设非常成功地解释了观察到的热体辐射的发射率。但是直到1926年另一位德国科学家威纳·海森伯表述了他的著名的不确定性原理之后，它对决定论的含义才被意识到。不确定性原理告诉我们，和拉普拉斯信条相反，自然限制我们利用科学定律预言将来的能力。这是因为，为了预言一个粒子未来的位置和速度，人们必须能够精确地测量其初始状态——也就是它现在的位置和速度。显然，做成此事的方法是把光照射到该粒子上。粒子把一些光波散射，观察者能够检测到这些波并用来指示粒子的位置。然而，给定波长的光只有有限的灵敏度，你测定粒子的位置不可能比测定光的两波峰间的距离更精确。于是，为了精密地测量粒子的位置，就必须利用短波长也就是高频率的光。但是按照普朗克量子假设，你不能使用任意小量的光：你至少要使用一个量子，在更高频率下其能量更高。这样，你希望越精确地测量粒子位置，你射到它上面的光量子的能量就必须越大。



可能的最微弱的光

微弱的光意味着较少的光子。任何颜色的最微弱的光是由单个光子携带的光。

根据量子理论，甚至一个光量子都会扰动粒子：它将以一种不能预言的方式改变其速度。而你使用的光量子的能量越大，扰动很可能就越大。这意味着，为了更精密地测量位置，当你必须使用能量更大的量子时，粒子的速度将被扰动一个更大的量。这样，你想把粒子的位置测量得越准确，你就只能越不准确地测量它的速度，反之亦然。海森伯指出，粒子位置的不确定性乘以它的速度的不确定性再乘以粒子质量绝不能小于某个固定的量。这意味着，如果你将位置的不确定性减半，你就必须将速度的不确定性加倍，反之亦然。自然永远强迫我们做这个折中。

这个折中有多么糟糕呢？这依赖我们在上面提及的“某个固定的量”的数值。那个量称做普朗克常数，它是一个非常微小的数。因为普朗克常数如此之微小，折中的效应，或者一般而言量子论的效应，正如相对论效应一样，在我们日常生活中是不能直接觉察到的（尽管量子论——作为诸如现代电子学这类领域的基础——的确影响我们的生活）。例如，如果我们把质量为1克的乒乓球的位置精确地确定在任何方向上1厘米之内，那么我们可以把它的速度确定到的精度，远远超过我们需要知道的程度。但是，如果我们测量一个电子的位置，精确至大约一个原子的范围，那我们对它速度的了解就一点也不精确，误差比大约正负每秒11000千米还要大。

不确定性原理指定的限制，与人们想测量粒子的位置或速度的方式，以及粒子的种类无关。海森伯的不确定性原理是世界一个基本的不可避免的性质，它对我们观察世界的方式有深远的意义。甚至在70多年之后，许多哲学家还没有充分了解这些，它们仍然是许多论战的主题。不确定性原理标志着拉普拉斯科学理论之梦的终结，这个理论是一个完全决定论的宇宙模型。如果我们甚至不能精密地测量宇宙现在的状态，肯定不能准确地预言未来的事件！

我们仍然可以想象，对于某个超自然体存在一族完全确定事件的定律，这个超自然体不像我们那样，能够在不干扰宇宙的情形下观测它现在的状态。然而，我们这些必朽的芸芸众生对这样的宇宙模型没有太大兴趣。看来最好使用称做奥铿剃刀的经济原理，将理论中不能观测到的所有特征都割掉。这种方法导致海森伯、厄文·薛定谔以及保罗·狄拉克在20世纪20年代，基于不确定性原理，将牛顿力学重新表达为称做量子力学的新理论。粒子在该理论中不再具有各自很好定义的位置和速度。相

反，它们具有一个量子态，那是位置和速度的一个结合，只有在不确定性原理的限制下才能定义位置和速度。

量子力学的一个变革性质是，它不对一次观测做出单独确定结果的预言。相反，它预言了一些不同可能的结果，并且告诉我们其中每种结果多么可能发生。那也就是说，如果你对大量相似系统做相同测量，其中每个系统都以相同方式起始，你会发现，在一定数目的情形测量结果为A，另一不同数目为B，等等。你可以预言结果为A或者B的近似的次数，但是你不能预言任何单独测量的特定结果。

例如，想象你往镖板上掷镖。根据经典理论——也就是旧的非量子理论——镖要么击中靶心，要么没有击中。而如果你知道掷镖时它的速度、引力拉力和其他这类因素，你就能算出它会不会击中。但是量子理论告诉我们这是错误的，你说不准。相反，根据量子理论，存在镖击中靶心的某种概率，还有镖落到板上任何其他给定面积的非零概率。对于像镖这么大的一个物体，如果经典理论——在这个情形下即牛顿定律——断言镖将击中靶心，那么你假定它将击中是保险的。至少，它未击中（根据量子理论）的概率是如此之小，以至于你继续以完全相同的方式掷镖，直至宇宙的终结，你也许仍然观察不到镖没有击中目标的情形。但是在原子尺度下情形就不同了。由单一原子构成的镖会有90%的击中靶心的概率，5%的机会击中板上的其他地方，还有5%的可能什么也没击中。你不能预先说可能发生哪种情形，你能说的只不过是，如果你多次重复此实验，可以预料，每重复实验100次，平均有90次镖将击中靶心。

因此，量子力学将一种不可预见性或者随机性的不可回避因素引入科学。尽管爱因斯坦在发展这观念时起过重要作用，但他却非常强烈地反对它。事实上，爱因斯坦正是由于对量子理论的贡献而获得诺贝尔奖。尽管如此，他从未接受宇宙是由机缘制约的观念；他的感情可以用他的名言来表达：“上帝不掷骰子。”

正如我们说过的，科学理论的检验是它预言实验结果的能力。量子理论限制了我们的能力，这意味着量子理论限制科学吗？如果科学要进展，我们从事科学的方法就得由自然规定。在这个情形下，自然需要我们重新界定我们有关预言的含义：我们也许不能准确预言每次实验的结果，但是我们能够多次重复该实验，并且确认不同结果可能出现的概率，正是量子理论所预言的。因此，尽管存在不确定性原理，但仍然没

必要放弃物理定律制约世界的信念。而事实上，正是因为量子力学和实验符合得很完美，大多数科学家最终心悦诚服地接受了它。

海森伯不确定性原理的一个最重要的含义是，粒子在某些方面像波一样行为。正如我们已经看到的，它们没有确定的位置，而是被一定的概率分布“抹平”。同样，虽然光是由波构成的，普朗克量子假设却又告诉我们，光在某些方面的行为仿佛是由粒子构成的：它只能以波包或者量子的形式发射或者吸收。事实上，量子力学的理论基于崭新类型的数学之上，它不再按照要么粒子要么波来描述实在的世界。为了某些目的，把粒子当成波是有用的，而为了其他目的，最好把波当成粒子，但是这些思维方式仅仅是方便而已。当物理学家们说在量子力学中存在波和粒子的对偶性时，他们指的就是这个意思。



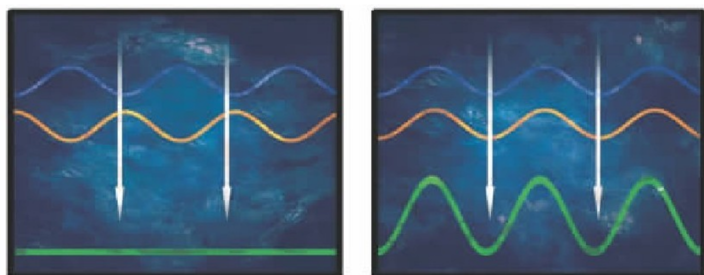
抹平的量子位置

根据量子理论，人们不能无限精确地测定一个物体的位置和速度，也不能准确地预言未来事件的过程。

在量子力学中类波行为的一个重要推论是，可以观察到两束粒子之间所谓的干涉。在正常情形下，干涉被认为是波的一个现象；也就是说，当波碰撞时，一束波的波峰可与另一束波的波谷重合，在这种情形下，就说两束波处于反相。如果发生碰撞的话，这两束波就相互对消，而不像人们可能预料到的，叠加成一个更强的波。对于光的情形，在肥皂泡上经常呈现彩色便是熟知的干涉例子。这是由形成泡泡的水的薄膜两边来的光的反射引起的。白光由所有不同波长或者不同颜色的光波组

成。对于一定的波长，从肥皂膜一边反射来的波峰和从另一边反射来的波谷重合，对应于这些波长的颜色就在反射光中缺失，因此反射光呈现彩色。

但是量子理论告诉我们，因为量子力学引入的对偶性，粒子也会发生干涉。所谓的双缝实验便是一个著名的例子。想象一个隔板——一堵薄墙——上面有两道平行的狭缝。在我们考虑粒子通过这些缝隙发送时会发生什么之前，让我们先考察当光照在上面会发生什么。你把特殊颜色（也就是特殊波长）的光源放在隔板的一边，大部分光会射到隔板上，但有少量光会穿过缝隙。现在假定你在隔板与光源相反的一边安放一个屏幕，屏幕上的任何一点将从两个缝隙接受波。但是，一般而言，光从光源通过一道缝隙到达该点和通过另一道缝隙到达该点必须行进的距离不同。由于行进的距离不同，从两个缝隙来的波在到达该点时将不会同相。在某些地方一个波的波谷会和另一个波的波峰重合，波会相互对消；在其他地方波峰和波谷会重合，波会相互加强；而在大多数地方，情形处于这两者之间。其结果是一个明暗相间的特征条纹。



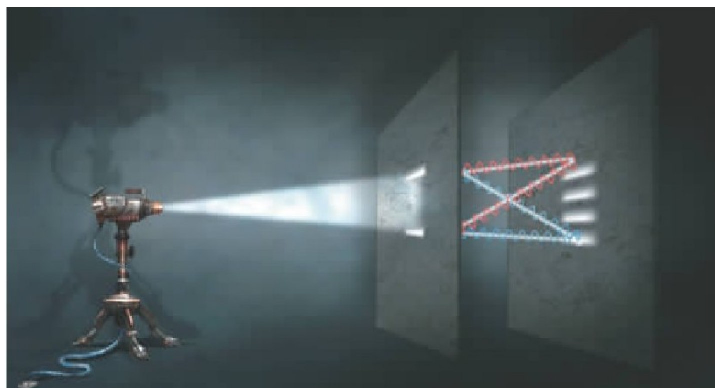
同相和反相

如果两个波的波峰和波谷相重合，它们就形成一个更强的波，但是如果一个波的波峰和另一个波的波谷相重合，这两个波就相互抵消。

如果你用具有确定速度的诸如电子的粒子源来取代光源，你会得到刚好同一类型的条纹，这真是令人吃惊。（根据量子理论，如果电子具有确定速度，则相应的物质波具有确定的波长。）假如你打开一道缝隙，并开始对着隔板发射电子，大多数电子都会被隔板阻止，但是有一些电子会通过缝隙，并到达另一边的屏幕。因此设想将隔板上的第二道缝隙打开，只不过增加打到屏幕的每一点上的电子数目而已，也许看起来是符合逻辑的。但是，如果你打开第二道缝隙时，打到屏幕上的电子数目在某些点增加，而在其他点减少，电子似乎像波一样在干涉，而不像粒子那样行为（见87页插图）。

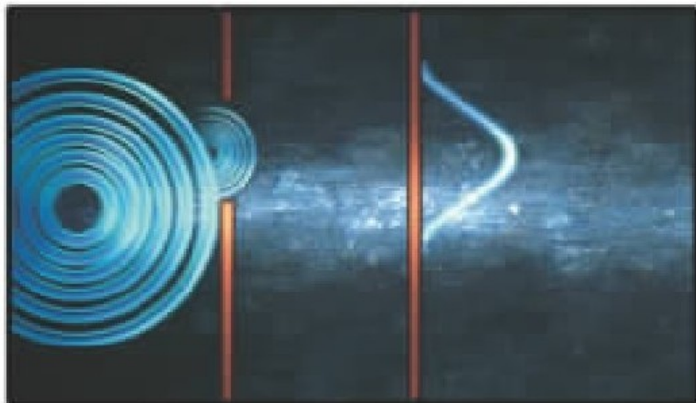
现在想象通过两个缝隙每次发射一个电子，仍然会存在干涉吗？人们也许会认为，每个电子通过这个或那个缝隙，摆脱了干涉条纹。然而在实际上，甚至当每次只发射一个电子时，仍然出现干涉条纹。因此，每个电子一定是在相同的时刻通过双缝，并且与自己干涉！

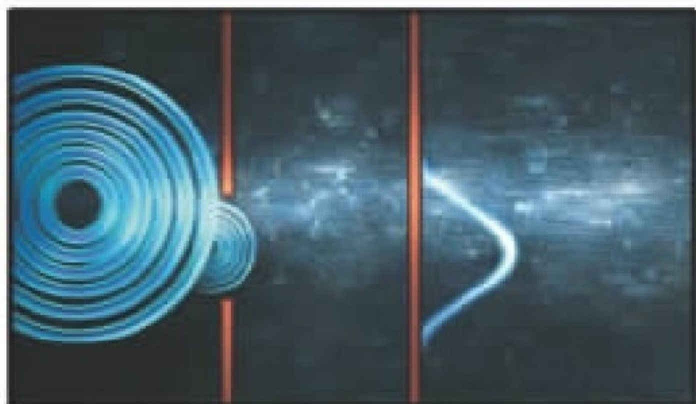
粒子间的干涉现象是我们理解原子结构的关键。原子是一个基本单位，我们以及我们周围的一切都是由原子构成的。20世纪初，人们认为原子和行星围绕太阳公转很相像，电子（具有负电荷的粒子）围绕着携带正电荷的中心核公转。人们认为正负电荷之间的吸引将电子维持在它们的轨道上，这与太阳和行星之间的引力的吸引把行星维持在轨道上的方式是一样的。这种观点的麻烦在于，在量子力学之前，力学和电学的经典定律预言以这种方式公转的电子会发出辐射。辐射会使它们损失能量，并且因此向内旋进，直至和核相撞。这意味着原子，其实也就是所有物体，都应该非常快地坍缩到一种非常紧密的状态，显然这并没有发生！

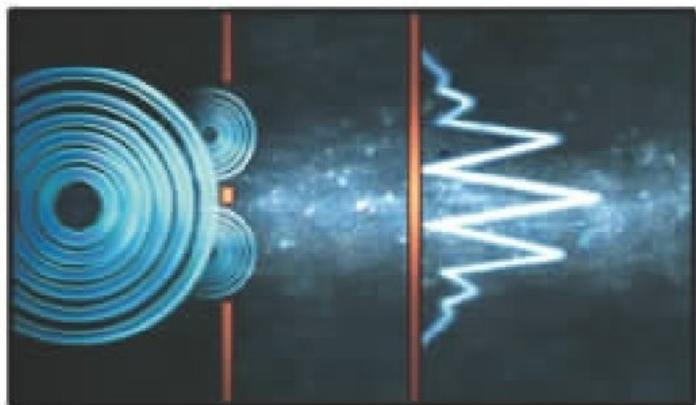


路径距离和干涉

在双缝实验中，波从顶缝和底缝到达屏幕。它们必须行进的距离随沿着屏幕的高度而变化。这导致波在一定高度上相互加强，在其他高度上相互对消，形成了干涉条纹。

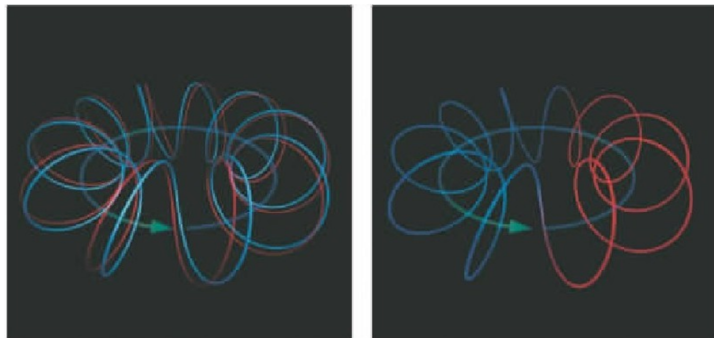






电子干涉

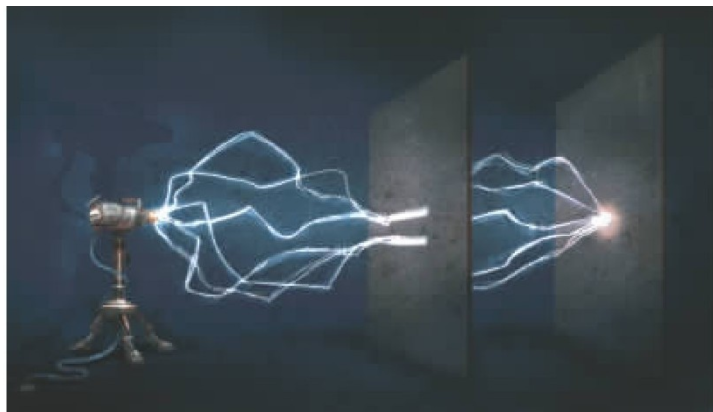
因为干涉，把一束电子通过双缝发射的结果并不相当于把电子分别通过每一单缝发射的结果。



原子轨道中的波

尼尔斯·玻尔把原子想象成由不断地环绕原子核的电子波组成。在他的图像中，只有周长对应于电子波长整数倍的轨道才能幸存，而不受到毁灭性的干涉。

1913年，丹麦科学家尼尔斯·玻尔为这个问题找到了部分的解。他提出，也许电子不能在离中心核任意距离上，而只能在某些特定的距离上公转。假定在这些特定的一个距离上只有一个或两个电子可以公转，就解决了坍缩的问题。这是因为一旦有限数目的内部轨道被充满了，电子就不能再进一步向里旋进。这个模型相当好地解释了最简单的氢原子的结构。氢原子只有一个电子围绕着核公转。但是，如何将其推广到更复杂的原子人们并不清楚。此外，允许轨道的有限集合的观念似乎仅仅是贴橡皮膏。它是数学上可行的技巧，但是无人知道自然必须这么行为的原因，或者它代表了什么更深的定律——如果存在的话。量子力学的新理论解决了这个困难。它揭示了一个围绕着核公转的电子可被认为是一个波，其波长依赖于它的速度。正如玻尔假设的，想象波在特定的距离上围绕着核循环。对某些轨道，轨道周长相当于电子波长的整数倍（和分数倍相反）。对于这些轨道，每循环一次其波峰还在同一位置，这样波就相互加强。这些轨道对应于玻尔允许的轨道。然而，对于长度不是波长整数倍的轨道，在电子循环时每一波峰都最终被波谷对消，这些轨道是不允许的。这样就解释了玻尔的允许和禁止轨道定律。



电子的许多路径

在量子理论的理查德·费恩曼表述中，一个粒子，比如这个从源到屏幕的电子，可以采取每一种可能的路径。

美国科学家理查德·费恩曼引入了所谓的对历史求和，这是一个摹想波粒对偶性的好方法。在经典非量子理论中假定粒子在时空中具有单独的历史或路径。相反，在费恩曼的方法中，假定粒子从A到B可以通过所有可能的路径。他用一对数与A和B之间的每一路径相关联，其中一个代表幅度或波的大小。另一个代表相位或在循环中的位置（也就是它是否处于波峰或者波谷，或者两者之间的某处）。一个粒子从A走到B的概率是将所有连接A和B的路径的波叠加而求得。一般来说，如果人们比较一族邻近的路径，其相位或在循环中的位置会有很大差别。这意味着和这些路径关联的波几乎完全被对消了。然而，对于一些邻近路径的集合，它们之间的相位变化不大，所以这些路径的波没有对消。这种路径对应于玻尔的允许轨道。

把这些观念以具体的数学形式表述，去计算在更复杂的原子甚至分子中的允许轨道，是相对直截了当的。分子是由一些原子组成的，围绕着多于一个核公转的电子把这些原子捆在一起。由于分子结构以及它们的相互反应是所有化学和生物学的基础，在原则上量子力学允许我们在不确定性原理设下的限制之内，预言我们在周围看到的几乎一切东西。（然而，在实际上，除了最简单的氢原子之外，我们不能解任何其他原子的方程。氢仅有一个电子。我们利用近似法和计算机去分析更复杂的原子和分子。）

量子理论已成为极其成功的理论，它几乎是所有现代科学和技术的基础。它制约着半导体和集成电路的行为，而后者是诸如电视和计算机

电子装置的最重要部件。此外量子力学还是现代化学和生物学的基础。引力和宇宙的大尺度结构是量子力学尚未适当纳入的仅有的物理科学领域：正如早先提到的，爱因斯坦的广义相对论没有考虑量子力学的不确定性原理，而为了和其他理论一致，这一点是应该的。

正如我们在上一章中看到的，我们已经知道广义相对论必须修改。因为经典（即非量子）广义相对论预言了无限密度的点——奇点——它也就预言了自己的垮台，正如经典力学暗示黑体应发射出无限能量，或者原子应坍缩成无限的密度，而预言了它的垮台一样。我们希望把经典广义相对论变成一个量子的理论——也就是创造量子引力论，来消除这些不可接受的奇点，正如我们处理经典力学一样。

如果广义相对论是错误的，那么为何迄今所有的实验都支持它呢？我们尚未注意到与观测有任何差异，其原因是我们通常经验的所有引力场都非常微弱。但是正如我们看到的，在早期宇宙中，当宇宙中的所有物质和能量都被挤压成非常小的体积时，引力场应变得非常强大。存在如此强大的场时，量子理论应有重要的效应。

尽管我们尚未拥有量子引力论，但我们的确知道一些我们相信它应该具有的特征。其中一项是，它应与费恩曼的按照对历史求和来表述量子理论的设想相合并。我们相信，爱因斯坦如下的思想肯定是作为任何终极理论部分的第二项特征，即引力场由弯曲的时空来代表，粒子企图沿着弯曲空间中最接近直线的东西运动，但是因为时空不是平坦的，它们的路径显得仿佛被引力场弯曲了。当我们把费恩曼对历史求和应用到爱因斯坦的引力观点时，那么粒子历史的类似物，现在就是代表整个宇宙历史的完整的弯曲时空。

在经典引力论中，宇宙只能以两种方式行为：要么它已存在了无限时间，要么它在过去的某一有限时间的奇点处有一个开端。基于我们早先讨论过的理由，我们相信宇宙并未存在过无限久。然而如果它有一个开端，根据经典广义相对论，为了知道爱因斯坦方程的哪个解描述我们的宇宙，我们必须知道它的初始态——也就是说，准确地知道宇宙如何起始。上帝也许最初就颁布了自然定律，但是从此之后，他似乎让宇宙按照这些定律演化，而且现在不干涉它。上帝如何选择宇宙的初始态或者初始位形呢？什么是时间开端的边界条件呢？因为经典广义相对论在宇宙的开端失效，所以在经典广义相对论中这是个问题。

另一方面，在量子引力论中出现了一个新的可能性。如果这是真的，就可以补救这个问题。在量子理论中，时空可能在范围上有限，但却没有形成时空的边界或边缘的奇点。时空就会像地球的表面，只不过多了两维。正如以前指出过的，如果你在地球表面沿着某一方向不断前进，你永远不会遭遇到一个不可逾越的障碍，却最终会返回到出发之处，并且不会撞上奇点。这样，如果情形果真如此，那么量子引力论开启了一种新的可能性，不会存在科学定律在那里失效的奇点。

如果时空没有边界，则不需要指定边界上的行为——不需要知道宇宙的初始状态，不存在我们必须祈求上帝或者某些新的定律为时空设定边界条件的时空边缘。我们可以讲："宇宙的边界条件是它没有边界。"宇宙会是完全自足的，并且任何外在于它的东西都不能对它施加影响。它既不被创生，也不被消灭，它只是存在。只要我们相信宇宙有个开端，造物主的作用似乎是清楚的。但是如果宇宙的确是完全自足的，没有边界或者边缘，既没有开端又没有终结，那么其答案就不这么显而易见：造物主还有什么作用呢？

·第10章·

虫洞和时间旅行

我们已在前面的几章中看到，有关时间本质的观点在漫长岁月中是如何变化的。直到20世纪初，人们还相信绝对时间。也就是说，每一事件都可由称为“时间”的一个数，以唯一的方式来标记，而且所有好的钟在测量两个事件之间的时间间隔上都是一致的。然而科学发现，光速对于无论在怎么运动的观察者都显得相同，这个发现导致了相对性理论——抛弃了存在唯一的绝对时间的观念。不能以唯一的方式标记事件的时间。相反，每一个观察者都有他自己的时间测量，由他携带的钟记录，而且不同观察者携带的钟不一定一致。这样，相对于测量时间的观察者而言，时间变成一个更为个人的概念。时间仍然被看成仿佛是一条笔直的铁轨，你只能往一个方向或另一个方向前进。如果该铁轨有环圈以及分叉，使得一直向前开动的火车返回原先通过的车站，那么会发生什么呢？换言之，某人可能旅行到未来或回到过去吗？H·G·韦尔斯在《时间机器》一书中探讨了这些可能性，正好像其他无数的科学幻想作家那样。科学幻想的许多观念，如潜水艇以及飞往月球等都已被科学实现了。那么，时间旅行的前景如何呢？

旅行到未来是可能的。那也就是说，相对论显示，人们可以创造一台时间机器，它使你在时间中往前跳跃。你步入时间机器，等待，步出，发现地球上的时间流逝比你体验到的要长久得多。我们今天还没有能够实现这些的技术，但是它只不过是个工程的问题：我们知道这是能够做到的。我们在第6章讨论过的双生子佯谬，利用那种情形是建造这种机器的一种方法。用这种方法，当你坐在这台时间机器里，它发射升

空，加速到接近于光速，继续一段时间（依你希望在时间旅行中要超前多少而定），然后返回。因为根据相对论，时间和空间是相关的，时间机器也是宇宙飞船，你对此不应感到惊讶。无论如何就你而言，在整个过程中，你所呆的地方仅仅是时间机器之中。而当你步出，你将发现在地球上流逝的时间比你度过的更久。你已经旅行到未来。但是你能返回过去吗？我们能创造逆时旅行的必要条件吗？

1949年，库尔特·哥德尔发现了爱因斯坦方程的一个新解，也就是广义相对论允许的一个新的时空。这是物理定律可能真的允许逆时旅行的第一个预示。宇宙的很多不同的数学模型满足爱因斯坦方程，但是这不表明它们对应于我们生活其中的宇宙。比如讲，它们在其初始或者边界条件上不同。为了决定它们能否对应于我们的宇宙，我们必须检查这些模型的物理预言。

哥德尔是一位数学家，他由于证明了不完备性定理而名震天下。该定理是说，不可能证明所有真的陈述，哪怕你仅仅去证明就像算术那样显然枯燥乏味的学科中所有真的陈述。正如不确定性原理一样，哥德尔的不完备性定理也许是我们理解和预言宇宙能力的基本限制。在普林斯顿高级学术研究所里，哥德尔和爱因斯坦度过他们的晚年。



时间机器

两位作者在时间机器中。

在那段时间里他通晓了广义相对论。哥德尔的时空具有一个古怪的性质：整个宇宙都在旋转。

整个宇宙正在旋转是什么意思呢？旋转意味着不停地转下去，这难道不表明存在一个固定的参考点吗？这样，你也许会问道："它相对于何物旋转？"其答案有点专业性，但是基本上是说，远处的物体相对于宇宙中的小陀螺或者陀螺仪的指向旋转。哥德尔时空的旋转性质有一个附加的数学效应。如果一个人从地球旅行到巨大距离以外，然后返回，他可能在出发之前就已经回到地球。

爱因斯坦过去认为广义相对论不允许时间旅行，而他的方程却允许这种可能性，这实在使他非常沮丧。尽管哥德尔发现的解满足爱因斯坦方程，因为我们的观测显示我们的宇宙不在旋转，至少没有明显地旋转，所以它不对应于我们生活于其中的宇宙。哥德尔宇宙也不膨胀，而我们的宇宙膨胀。然而，从那时以后，研究爱因斯坦方程的科学家们已

经找到了广义相对论的确容许逆时旅行的其他时空。然而，微波背景以及对诸如氢和氦元素的丰度的观测表明，早期宇宙并不具有这些模型的允许时间旅行的那种曲率。如果无边界设想是正确的，根据理论也能得到同样的结论。这样，问题就变成：如果宇宙在起始时没有时间旅行所需的那类曲率，我们随后能否将时空的局部区域翘曲得足够厉害，进而允许时间旅行？

再重复一下，由于时间和空间是相关的，一个和逆时旅行紧密相关的问题是你能否行进得比光还快，这一点也许不会使你惊讶。很容易看出，时间旅行意味着超光速旅行：在你旅程的最后阶段做逆时旅行，就能够使你的整个旅行，在你希望的任意短的时间内完成，而这样你就能以不受限制的速度行进！但是，正如我们将要看到的，倒过来也是成立的：如果你能以不受限制的速度行进，你也能够逆时旅行。其中一者成立而另一者不成立是不可能的。

科学幻想作家十分关切超光速旅行的争论。他们的问题是，根据相对论，如果我们往最邻近的恒星，大约4光年那么远的比邻星，发射宇宙飞船，我们预期至少要等待8年，旅行者才能返回，而告知他们的发现。但若要到我们星系中心去探险，则至少要花费10万年才能返回。如果你要写星系际大战则前景不妙！不过，相对性理论的确让我们得到一个安慰，让我们再沿着第6章中关于双生子佯谬讨论的思路：对于空间旅行者来说，这个旅程可能比留在地球上的人要感觉短促得多。但是在空间旅行老了几年的人，再返回时并没有什么太大的喜悦，因为你会发现当时留下的每一个人都已经死亡几千年了。所以为了使人们对科学幻想作家们的故事感兴趣，他们必须假定，我们会有朝一日发现如何进行超光速旅行。这些作者中的大多数似乎还未意识到这一事实，即如果你能超光速旅行，则相对性理论意味着你还能逆时旅行，正如以下五行打油诗所言：

年轻的小姐叫怀特，

她行比光快得多。

她以相对性的方式，

在当天才刚刚出发，

却早已于前晚到达。

与此相关的要点是，相对性理论不仅认为不存在让所有观察者同意的唯一的时间测量，而且认为在一定的情况下，观察者们甚至在事件时序上的看法也不必一致。特别是，如果两个事件A和B在空间上相隔得如此远，一个火箭必须行进得比光还快才能从事件A到达事件B，那么两位以不同速度运动的观察者，会对事件A在事件B之前发生，还是事件B在事件A之前发生产生异议。例如，假定事件A是2012年的奥林匹克竞赛的100米决赛的结束，而事件B是比邻星议会第1001 004届会议开幕式。假设对于地球上的一名观察者而言，事件A发生在前，然后才是事件B。比方说按照地球的时间，B发生在一年之后，即2013年。由于地球和比邻星相距4光年左右，这两个事件满足上述的判据：虽然A在B之前发生，但是你必须进行超光速旅行才能从A到达B。那么对于在比邻星上，在离开地球方向以接近光速旅行的观察者看来，事件的时序就显得颠倒了：事件B在事件A之前发生。这位观察者会说，如果你可以超光速运动就能够从事件B到达事件A。事实上，如果你旅行得实在快，你还来得及在赛事之前从A赶回到比邻星，并且在得知谁是赢家的情形下投放赌注！



虫洞

如果虫洞存在的话，它们可以为空间中相距遥远的点之间提供捷径。

要打破光速壁垒存在着一个问题。相对论告诉我们，一个宇宙飞船的速度越接近光速，用以对它加速的火箭功率就必须越大。对此我们已有实验的证据，但不是宇宙飞船的经验，而是在诸如费米实验室或者欧洲核子研究中心（CERN）的那些粒子加速器中的基本粒子的经验。我们可以把粒子加速到光速的99.99%，但是不管我们注入多大功率，也不可能把它们加速到超过光速壁垒。宇宙飞船的情形也类似：不管火箭有多大功率，它们也不可能加速到超过光速。而且因为只有在超光速旅行成为可能时，才能逆时旅行，这似乎既排除了高速空间旅行，又排除了逆时旅行。

然而，可能还有出路。你也许可以把时空卷曲起来，使得在A和B之间有一条近路。在A和B之间建立一个虫洞就是一个方法。顾名思义，虫洞就是一个时空细管，它能把两个几乎平坦的相隔遥远的区域连接起来。它有点像处于巍峨的山脊的底部。为了到达另一边，你通常要往上攀登很长距离，然而再往下来——但是如果有一个水平穿过岩体的巨大虫洞，你就不必如此了。你可以想象去建立或者发现从我们太阳系邻近通往比邻星的一个虫洞。尽管在通常的空间中地球和比邻星相隔2000000亿英里，而通过这个虫洞的距离却可能只有几百万英里。如果我们通过虫洞传递百米赛事的消息，可以比议会开幕早很多到达。但是后来一名向地球飞去的观察者也应该能找到另一个虫洞，使他能从比邻星议会的开幕赶在赛事之前回到地球。因此，正和其他可能的超光速旅行一样，虫洞允许人们逆时旅行。

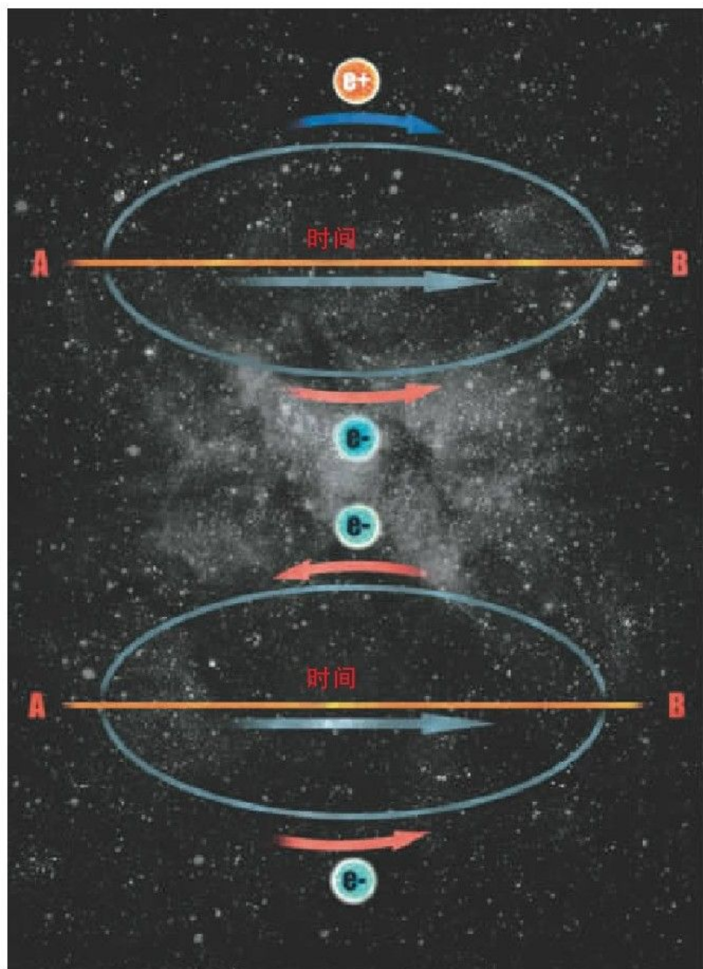
时空不同区域之间的虫洞的思想并非科学幻想作家的发明，它的来源是非常令人敬重的。1935年，爱因斯坦和纳珍·罗森写了一篇论文。在论文中，他们指出广义相对论允许他们称为“桥”，而现在称为虫洞的东西存在。爱因斯坦-罗森桥只能维持很短时间，宇宙飞船来不及穿越：由于虫洞紧缩，飞船会撞到奇点上去。然而有人提出，一个先进的文明可能使虫洞维持开放。为了达到这个目的，或者用任何其他方式翘曲时空，以便时间旅行。你可以证明，你必须有一个负曲率的时空区域，如同一个马鞍面。通常的物质具有正能量密度，赋予时空正曲率，如同一个球面。所以，为了使时空卷曲到允许逆时旅行的方式，人们需要负能量密度的物质。

具有负能量密度是什么意思呢？能量有点像金钱：如果你的银行余额是正的，你就可用不同方式分配它，但是根据一个世纪前信奉的经典定律，你不得透支。于是，这些经典定律已经排除了负能量密度，也就是逆时旅行的任何可能性。然而，正如在前面几章所描述的，以不确定性原理为基础的量子定律已经超越了经典定律。量子定律更慷慨些，只要你总的余额是正的，你就可以从一个或两个账户透支。换言之，量子理论允许在一些地方的能量密度为负，只要在其他地方的正的能量密度能把它补偿，使得总能量保持为正就可以了。因此，我们有理由相信，不但时空可被翘曲，而且它能被弯曲成允许逆时旅行所需要的样子。

根据费恩曼的对历史求和，在单个粒子尺度上，在某种程度上的确发生逆时旅行。在费恩曼方法中，通常粒子顺时运动等效于反粒子逆时

运动。用他的数学方法，人们可以将一对粒子/反粒子一起创生并相互湮灭，看成单独粒子在时空中的一个闭圈上的运动。为了看到这一点，首先以传统方式想象这个过程。在某一时刻——比如说时刻A——创生了一对粒子/反粒子，两者都做顺时运动。接着在后来的时刻B，它们再互相作用，并且互相湮灭。在A之前以及B之后，两个粒子皆不存在。但是依照费恩曼的理论，你可用不同的观点看待之。一个单独粒子在时刻A创生，它顺时运动到B，然后它逆时回到A。取代粒子和反粒子一道的顺时运动，只有一个单独粒子沿着“圈环”从A运动到B然后再返回。当该物体顺时（从A至B）运动时，它被称为粒子。然而当该物体逆时（从B至A）旅行时，它显现为一个顺时旅行的反粒子。

这种时间旅行能产生观测效应。例如，假设粒子/反粒子对中的一个成员（例如，反粒子）落入黑洞中去，留下另一个成员，没有伙伴可与之相湮灭。这被遗弃的粒子也可以落入黑洞，但是它也可以从黑洞邻近逃逸。如果这样的话，对于一位远处的观察者，它就像一个从黑洞发射出的粒子。然而，你可以对从黑洞辐射的发射机制有一个不同但是等效的直觉的图像。你可把落入黑洞的粒子对的这个成员（例如反粒子）当成从黑洞中出来做逆时旅行的粒子。当它到达粒子/反粒子对一起出现的那一点时，它被黑洞的引力场散射成向时间正方向运动的粒子，并从黑洞逃逸。或者相反，如果粒子对的粒子成员落入黑洞，你可以把它当成逆时旅行的反粒子，并从黑洞出来。这样，黑洞的辐射显示，量子理论允许微观尺度上向时间过去的时间旅行。



费恩曼秘诀中的反粒子

反粒子可以认为是向时间过去旅行的粒子。

因此虚粒子/反粒子对可以认为是在时空中的闭合圈环上运动的一个粒子。

因此，我们可以诘问量子理论是否容许以下的可能性，一旦在科学技术上取得进展时，我们是否最终能够设法建造一台时间机器。初看起来，似乎应该是可能的。费恩曼对历史求和的设想假定是对于所有历史进行的。这样，它应包括这类历史，其时空被翘曲到允许逆时旅行的程度。然而，即使已知的物理定律似乎不排除时间旅行，但是依然还有其他理由，质疑这是否真的可能。

问题在于，如果人们可以逆时旅行，为什么从未有来自未来的人，回来告诉我们如何实现呢？鉴于我们现在处于初级发展阶段，也许有充

分理由认为，让我们分享时间旅行的秘密是不明智的。除非人类本性得到彻底改变，否则难以置信，某位从未来飘然而至的访客会贸然泄露天机。当然，某些人会宣称，发现幽浮（UFO）就是外星人或者来自未来的人们造访的证据。（鉴于其他恒星的巨大距离，如果外星人在合理的时间内到达此地，他们则需要超光速旅行，这样两种可能性其实是等同的。）未曾有过来自未来的访客，这可以用以下方法解释，因为我们观察了过去，并且发现它并没有允许从未来旅行返回所需的那类卷曲，所以过去是固定的。另一方面，未来是未知的、开放的，所以它很可能具有所需要的曲率。这意味着，任何时间旅行都被局限于未来。此时此刻，柯克船长和进取号星际飞船没有机会来临。

这也许可以解释，当今世界为何还没被来自未来的游客充斥。但是，如果可能回到以前并改变历史，则仍然不能回避另一类由此引起的问题：那么，为什么我们不和历史过不去呢？例如，假定某人回到过去并且将原子弹的秘密给予纳粹，或者你回到过去并且将你的曾曾祖父在他得到孩子之前杀死。这类佯谬有许多版本，但是它们在根本上是等效的：如果我们有改变过去的自由，则我们就会遇到矛盾。

似乎存在两种可能的方法去解决由时间旅行导致的佯谬。第一种可以称为协调历史方法。它是说，即使时空被卷曲得可能逆时旅行，在时空中所发生的必须是物理定律的协调的解。换言之，根据这个观点，除非历史已经表明，你曾经到达过去，并且当时并没有杀死你的曾曾祖父，或者没有采取任何行为，这些行为和到达你现状的历史相冲突，你才能在时间中回到过去。况且，当你回到过去，你不能改变记载的历史，你仅仅是跟随着它。按照这一观点，过去和将来是注定的：你没有自由意志为所欲为。

当然，人们可以说，自由意志反正是虚幻的。如果确实存在一套制约万物的完备的物理理论，它也似乎决定你的行动。但是对于像人类这么复杂的机体，它的制约和决定方式是不可能计算的，而且这里还牵涉到量子力学效应引起的某种随机性。这样，有一种看法是，我们说人类具有自由意志，那是因为我们不能够预言他们未来的行为。然而，如果一个人乘火箭飞船出发并在这之前已经回返，因为他的未来行为是记载的历史的一部分，所以我们就能够预言之。这样，在那种情形下，时间旅行者在任何意义上都没有自由意志。

解决时间旅行佯谬的其他可能方法可以称做选择历史假想。其思想

是，当时间旅行者回到过去，他们进入和记载的历史不同的另外的历史中去，这样，他们可自由地行动，不受和他们原先历史相一致的约束。史蒂芬·斯匹柏十分喜爱影片《回归未来》中的创意：玛提·马克弗莱能够回到过去，并把他双亲恋爱的历史改得更令人满意。

听起来，选择历史假想和理查德·费恩曼把量子理论表达成历史求和的方法相类似，正如第9章所描述的。这是说宇宙不仅仅有一个独立历史；它具有每一种可能的历史，每种历史都有各自的概率。然而，在费恩曼的设想和选择历史之间似乎存在一个重要的差别。在费恩曼求和中，每一种历史都是由完整的时空和其中的每一件东西组成的，时空可以被卷曲成可能乘火箭旅行到过去的程度。但是火箭要留在同一时空，并从而留在同一历史中，历史必须是一致的。这样，费恩曼的历史求和的设想似乎支持协调历史假想，而不支持选择历史的思想。

如果我们接受我们可称做时序防卫的猜测，就能避免这些问题。这是说，物理学定律共同防止宏观物体将信息传递到过去。这个猜测还未被证明，但是有理由相信它是真的。其原因是，当时空被翘曲得可能旅行到过去时，利用量子理论的计算显示，不断绕着一个闭合圈环运动的粒子/反粒子对能够产生足够大的能量密度，赋予时空以正的曲率，抵消了允许时间旅行的翘曲。因为究竟是否如此还不清楚，时间旅行的可能性仍然未决。但是不要为之打赌，你的对手或许具有通晓未来的不公平的优势。

·第11章·
自然的力和物理学统一

正如在第3章中解释的，一蹴而就地建立一个完备的宇宙万物统一理论是非常困难的。取而代之，在寻求描述有限范围内的事件的部分理论方面，我们取得了进展，此时忽略了其他效应或者用某些数来对这些效应做近似。尽管我们目前知道，科学定律包含许多数——比如电子电荷的大小和质子电子质量比——但至少现在，我们不能从理论中把它们预言出来。相反，我们必须利用观测将它们找出，然后把它们放到方程中去。某些人将这些数称做“基本常数”，另一些人把它们叫做胡说因素。

不管你持何种观点，以下的事实是值得注意的，这些数值似乎被非常精细地调节过，使生命可能发展。例如，如果电子的电荷稍微不同，它就破坏了恒星中的电磁力和引力的平衡，它们要么没有燃烧氢和氦，要么没有爆发。不管哪种情形发生，生命都不能存在。归根结底，我们希望找到一个完备的协调的统一理论，它将所有这些部分理论作为近似而包容进去，而不必为理论中的任意数，诸如电子电荷强度选取合适的值，以此调节这些部分理论来与事实相符合。

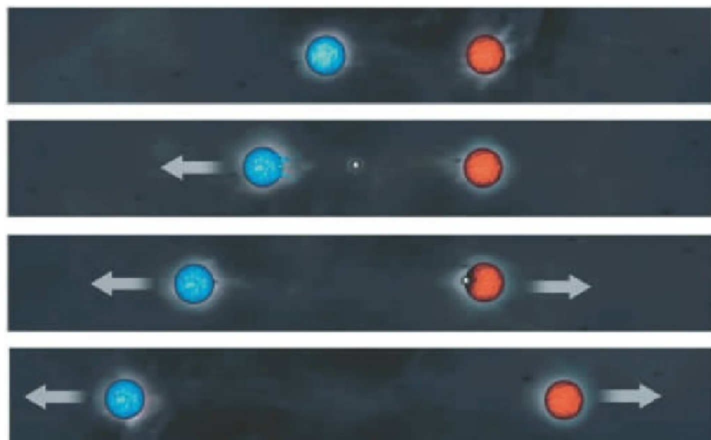
寻求这样一个理论称做物理学的统一。爱因斯坦用他晚年的大部分时间去寻求统一理论，但是没有成功。因为尽管已有了引力和电磁力的部分理论，但是关于核力，当时知道得还非常少，所以时机还没有成熟。此外，正如在第9章提到的，爱因斯坦拒绝相信量子力学的真实性。但是，不确定性原理似乎是我们生活于其中的宇宙的一个基本特征。因此，一个成功的统一理论必须将这个原理结合进去。

因为我们已对宇宙了解得这么多，现在寻求这种理论的前景似乎要好得多了。但是我们必须防止过分自信——我们在过去有过对成功的错误的期望！例如，在20世纪初，曾经以为任何东西都可以按照连续物质诸如弹性和热导的性质予以解释。原子结构和不确定性原理的发现使之彻底破产。然后又有一次，1928年，物理学家、诺贝尔奖获得者马克斯·玻恩告诉一群来格丁根大学的访问者：“根据我们所知，物理学将在6个月内结束。”他的信心是基于狄拉克新近发现的制约电子的方程。人们认为质子，这个当时仅知的另一种粒子服从类似的方程，并且那将会是理论物理的终结。然而，中子和核力的发现对此又是当头一棒。尽管讲到这些，仍然有理由谨慎地乐观，我们现在也许已经接近探索自然终极定律的尾声。

在量子力学中，物质粒子之间所有的力或者相互作用应该都是由粒子携带的。所发生的是，诸如电子或者夸克等物质粒子发射了携带力的粒子。这个发射所引起的反弹，改变了物质粒子的速度，其道理和发射炮弹之后大炮后退是相同的。然后，携带力的粒子又和另一物质粒子碰撞并被吸收，改变了那个粒子的运动。发射吸收过程的净结果和在两个物质粒子之间有过一个力相同。

每种力都是由它自己特有的携带力的粒子来传递。如果携带力的粒子具有大质量，产生和在远距离上交换它们就很困难，于是它们携带的力只能是短程的。另一方面，如果携带力的粒子没有自身的质量，该力就是长程的。由于在物质粒子之间交换的携带力的粒子，不像实粒子，它们不能被粒子探测器直接探测到，所以被称为虚粒子。然而，因为它们具有可测量的效应：它们引起了物质粒子之间的力，所以我们知道它们存在。

携带力的粒子可分成4个种类。应该强调的是，这样地分成4种是人为的；只是为了便于建立部分理论，但是它也许不具深意。大多数物理学家希望最终能找到一个统一理论，统一理论将把所有这4种力解释成为一种单独的力的不同方面。的确许多人愿意说，这是当今物理学的首要目标。



粒子交换

根据量子理论，力是由交换携带力的粒子引起的。

第一种力是引力。这种力是万有的；也就是说，每一个粒子都因它的质量或能量而感受到引力。引力吸引被描写成因交换称做引力子的虚粒子引起的。引力比其他三种力都弱得多；它是如此之弱，若不是它具有两个特别的性质，就根本不可能引起我们的注意：它会作用到非常远的距离，并且总是吸引的。这意味着，在像地球和太阳这样两个巨大的物体中，单独粒子之间的非常弱的引力能叠加起来，产生可观的力量。另外三种力或者由于是短程的，或者由于时而吸引时而排斥，所以它们倾向于互相抵消。

第二种力是电磁力。它和诸如电子和夸克之类的带电荷的粒子相互作用，但不和诸如中微子之类的不带电荷的粒子相互作用。它比引力强得多：两个电子之间的电磁力比引力约大100亿亿亿亿亿（在1后面有422个零）倍。然而，有两种电荷：正电荷和负电荷。两个正电荷之间正如两个负电荷之间一样，力是排斥的，但是在一个正电荷和一个负电荷之间的力是吸引的。

一个大的物体，比如地球或者太阳，具有几乎等量的正电荷和负电荷。这样，单独粒子之间的吸引力和排斥力几乎全部相互抵消掉，而余下的净电磁力非常小。然而，在原子和分子的小尺度下，电磁力起主要作用。在带负电的电子和带正电的核中的质子之间的电磁力使得电子围绕着原子核公转，正如同引力使得地球围绕着太阳公转一样。科学家把电磁吸引力描绘成由大量称做光子的虚粒子的交换引起的。再说一遍，被交换的光子又是虚粒子。然而，当一个电子从一个轨道转换到另一个

离核更近的轨道时，它释放出能量并且发射一个实光子——如果其波长刚好，则作为可见光被肉眼观察到，或者被诸如照相底片之类的光子探测器观察到。同样，如果一个光子和原子相碰撞，它会将电子从离核较近的轨道移到外面更远的轨道。这就把光子的能量消耗殆尽，于是光子就被吸收了。

第三种力称为弱核力。我们在日常生活中并不直接接触到这种力。然而，它导致放射性——原子核衰变。直到1967年伦敦帝国学院的阿伯达斯·萨拉姆和哈佛的史蒂芬·温伯格提出把这个相互作用和电磁力统一的理论后，我们才清楚地理解弱核力。此举正如大约100年前麦克斯韦统一电学和磁学一样。该理论的预言与实验非常符合，使萨拉姆和温伯格以及也在哈佛的谢尔登·格拉肖一起获得了1979年的诺贝尔物理学奖。格拉肖提出过类似的统一电磁力和弱核力的理论。

第四种力是强核力。它是4种力中最强的力。这是另一种我们并不直接接触的力，但是正是这种力将我们日常世界的大部分东西维系在一起。它将质子和中子中的夸克束缚在一起，并将原子中的质子和中子束缚在一起。如果没有强核力，那么带正电荷的质子之间的电斥力将导致宇宙中的每个原子核分崩离析，除了只包含一个质子的氢原子核之外。科学家相信，这种力由称做胶子的粒子携带，它只和自身以及夸克相互作用。

统一电磁力和弱核力的成功，使许多人试图将这两种力和强核力合并在所谓的大统一理论（简称GUT）之中。这称号相当夸张：所得到的理论并不那么辉煌，也没把全部力都统一进去，因为它并不包含引力。因为它们包含了一些不能从这个理论预言，而必须人为选择去适合实验的参数，所以它们也不是真正完备的理论。尽管如此，它们可能向着完备的全面统一理论推进了一步。

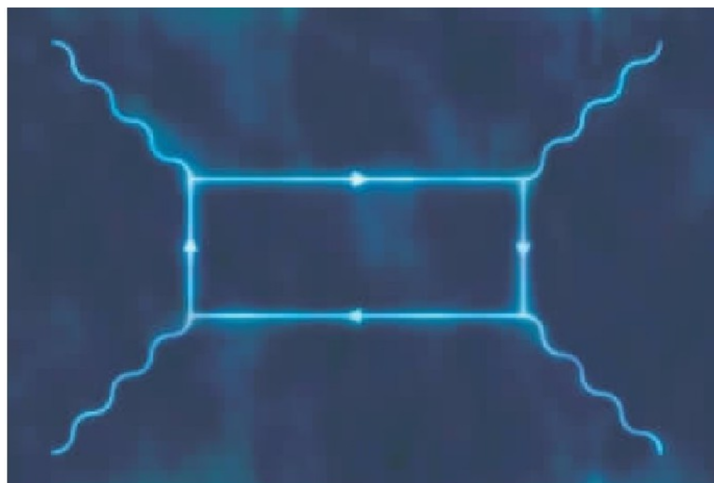
寻找一个把引力和其他力统一的理论的主要困难在于，引力论——广义相对论——是仅有的非量子的理论：它没有考虑不确定性原理。因为其他力的部分理论，以非常根本的方式依赖于量子力学，为了把引力和其他理论统一，就需要寻找把该原理结合到广义相对论中的一种方法。但是迄今还无人能够找到一种量子引力论。

创造量子引力论之所以如此困难与这个事实有关：不确定性原理意味着甚至“空虚的”空间也充满了虚的粒子/反粒子对。如果情形并非如此

——即如果“空虚的”空间真的是完全空虚的——那就意味着所有的场，比如引力和电磁场就必须精确地为零。然而，场的值及其随时间的变化率与粒子的位置和速度（也就是位置的改变）相像：不确定性原理意味着，人们越精确地知道这些量中的一个，则只能越不精确地知道另一个量。所以，如果在空的空间中的一个场被精确地固定在零上，那么它就既有准确的值（零），又有准确的变化率（也为零），这就违反了上述原理。这样，在场的值中必须有不确定性或者量子涨落的某个最小量。

人们可以将这些涨落看成许多在某一时刻同时一起出现，运动分开，然后又走到一起，并且相互湮灭的粒子对。它们像携带力的粒子一样是虚粒子，而不像实粒子，它们不能用粒子检测器直接观测到。然而，它们的间接效应，诸如电子轨道的能量的微小改变，可以测量到，而这些数据和理论预言符合的精确程度令人印象深刻。在电磁场涨落的情形下，这些粒子是虚光子，而在引力场涨落的情形下，它们是虚引力子。然而，在弱力场和强力场涨落的情形下，虚粒子对是物质粒子对，例如电子或者夸克以及它们的反粒子。

问题在于虚粒子具有能量。事实上，因为有无数的虚粒子对，它们似应具有无限的能量，因此，由爱因斯坦的方程$E=mc^2$（见第5章）可知，它们似应具有无限的质量。根据广义相对论，这意味着它们的引力会将宇宙弯曲到无限小尺度。那显然没有发生！在其他部分理论——强、弱和电磁力的理论——中也发生类似的似乎荒谬的无限大，但是所有这些情形下的无限大都可用称为重正化的过程消除掉，这就是为什么我们能够创造出那些力的量子理论。



虚粒子/反粒子对的费恩曼图

把不确定性原理应用到电子，就使得即便在空虚的空间中，虚粒子/反粒子对也会出现，然后再相互湮灭。

重正化牵涉到引入新的无限大，它具有消除理论中产生的无限大的效应。然而，它们无需被准确地消除。我们能够选择这新的无限大以便留下小的余量。这些小的余量在理论中称为重正化的量。

尽管在实际中这个技巧在数学上相当可疑，但是它似乎的确行得通，并用来与强、弱和电磁力的理论一起做出预言，这些预言和观测的一致达到非凡的精度。然而，从企图找到一个完备理论的观点看，由于重正化意味着不能从理论预言质量和力的强度的实际值，它们必须被选择出来去符合观测，因此重正化具有一个严重的缺陷。不幸的是，在企图利用重正化从广义相对论中消除量子的无限大时，我们只有两个可以调整的量：引力的强度和宇宙常数的值。因为爱因斯坦相信宇宙不再膨胀，他将宇宙常数项引进了他的方程（见第7章）。结果是，调整它们不足以消除所有的无限大。因此人们得到的量子引力论似乎预言，诸如时空曲率之类的某些量真的无限大——但是观察和测量表明这些量全然有限！

把广义相对论和不确定性原理结合在一起可能会有这个问题，这一点被质疑了一段时期，在1972年通过仔细的计算后才得到最后证实。4年之后，科学家提出了一种叫做超引力的可能解决方法。不幸的是，去找出在超引力中是否存在未被对消而留下的无限大的计算，是如此之冗长和困难，以至于没人准备着手去进行。即使利用计算机，预计也要花费许多年，况且至少犯一个也许更多错误的可能性是非常大的。于是只有当其他人重复计算，并得到同样答案时，我们才能断定已经取得了正确的答案，但这似乎是不太可能的！尽管存在这些问题，尽管超引力理论中的粒子似乎和观测到的粒子不相符合，大部分科学家仍然相信，可以修改超引力理论，它也许是统一引力和其他力问题的正确答案。然后，在1984年，人们的看法发生了显著的改变，他们转去喜欢所谓的弦理论。

在弦论之前，人们认为每个基本粒子占据空间中的单独的点。在弦论中，基本对象不是点粒子，而是具有长度但不具有其他维，正如一段无限细的弦的东西。这些弦可以有端点（所谓的开弦），也可以自身首尾相接成闭合的圈环（闭弦）。一个粒子在每一时刻占据空间的一点。另一方面，一根弦在每一时刻占据空间的一根线。两段弦可以连接在一

起，形成一根单独的弦；在开弦的情形下，只要将它们的端点连在一起即可，在闭弦的情形下，像是两条裤腿合并成一条裤子。类似地，一根单独的弦可以分解成两根弦。

如果弦是宇宙中的基本对象，那么我们在实验中似乎观测到的点粒子又是什么呢？在弦论中，原先认为是不同的点粒子，现在被描绘成弦上的各种波，犹如振动着的风筝的弦上的波。但是，弦以及沿着它的振动如此之微小，甚至我们最好的技术都不能识别它的形状，所以在我们的所有实验中，它们像微小的没有特征的点在行为。想象凝视一个小尘埃：你靠近它，或者在显微镜下就会发现这斑点具有无规则的甚至类弦的形状，但从远处看，它就像一个无特征的点。

在弦论中，一个粒子被另一个粒子发射或者吸收，与弦的分解与合并相对应。例如，太阳作用到地球上的引力，在粒子理论中被描绘成由称为引力子的携带力的粒子引起的，太阳上的一个物质粒子发射出引力子，并被地球的一个粒子吸收。在弦论中，这个过程相应于一个H形状的管（弦论在一定程度上有点像管道工程）。H两个垂直的边对应于太阳和地球上的粒子，而水平的横杠对应于在它们之间运动的引力子。

弦论的历史很古怪。它原来是20世纪60年代后期发明的，试图用来找出一个描述强力的理论。其思想是，诸如质子和中子这样的粒子可以被认为是一根弦上的波。这些粒子之间的强力对应于连接其他一些弦片段之间的弦片段，正如在蜘蛛网中一样。这弦必须像具有大约10吨拉力的橡皮带，理论才能给出粒子之间强力的观察值。

1974年，巴黎高等师范大学的朱勒·谢尔克和加州理工学院的约翰·施瓦兹发表了一篇论文，指出弦论可以描述引力的性质，只不过在弦上的张力大约是11000万亿亿亿亿吨（1后面跟39个零）。在通常尺度下，弦论的预言和广义相对论的预言刚好相同，但是在非常小的距离下，即是比10亿亿亿亿分之一厘米（1厘米被1后面跟33个零除）还小时，它们就不一样了。然而，他们的工作并没有引起太多的注意，因为大约正是那时候，大多数人抛弃了原先的强力的弦论，而倾心于以夸克和胶子为基础的理论，后者似乎和观测符合得更好得多。谢尔克死得很惨（他受糖尿病折磨，因身边没人给他注射胰岛素而昏迷死去），这样一来，施瓦兹几乎成为弦论的唯一支持者，只不过现在设想的弦张力要大得多而已。

1984年，人们对弦论的兴趣突然复活，显然由于两个原因，其中的一个原因是，在证明超引力是有限的或者用它解释我们观察到的粒子种类方面，人们未能真正取得多少进展。另一个原因是，约翰·施瓦兹这一回和伦敦玛丽皇后学院的迈克·格林发表了另一篇论文。这篇论文指出，弦论能够解释内禀的左手征的粒子存在，正如我们观察到的一些粒子那样。（当你将实验装置完全对调成像它在一面镜子里反射的那样，多数粒子的行为将是相同的，但是这些粒子的行为会改变。它们仿佛是左撇子——或者右撇子，而不是左右手都灵巧的。）不管是出于什么原因，许多人很快开始做弦论的研究，而且发展了新的版本，它似乎能够解释我们观测到的粒子种类。

弦论也导致无限大，但是人们认为它们在正确的版本中会完全对消掉（虽然这一点还未确认）。然而，弦论有更大的问题：似乎只有当时空是十维或者二十六维，而不是通常的四维时，它们才是协调的！当然，额外的时空维是科学幻想的老生常谈。它们的确提供了一种理想方法，克服广义相对论中人们不能超光速或者逆时旅行的通常限制（见第10章）。其思想是通过额外维抄近路。你可用以下方法描绘这一点。想象我们生活的空间只有二维，并且弯曲成像一个锚环或甜圈饼的表面。如果你处在这环的内侧一边，而要到环内侧的另一边的点上去，你必须沿着环的内边缘上的圆圈走，直至目标点。然而，如果你能够在第三维空间里旅行，则可以离开这环，直接穿过去。



弦论中的费恩曼图

在弦论中，长距力被看成由连接它们的管子，而非携带力的粒子交换引起的。

如果这些额外维确实存在，为什么我们全然没有觉察到它们呢？为什么我们只看到3个空间维和1个时间维呢？人们的看法是，其他的维不像我们习惯的维那样。它们被卷曲成非常小的尺度的空间，大约为1英寸的一百万亿亿亿分之一。我们根本无从觉察到这么小的尺度：我们只能看到1个时间维和3个空间维，在这些维中的时空是相当平坦的。想象一根麦秸的表面就能知道怎么回事了。如果你近看它，就会发现其表面

是二维的。也就是说，由两个数来描述麦秸上的点的位置，一个是沿着麦秸的长度，一个是围绕着圆周方向的距离。但是其圆周的维比其长度的维小很多。正因为这个原因，当你远看麦秸时，你分辨不出它的粗细，而它就显得是一维的了。也就是说，仿佛你只要给出沿麦秸的长度，就可以指明点的位置。于是关于时空，弦论家们是这样说的：在非常小的尺度下它是十维的，并且被高度弯曲，但是在更大的尺度下你看不见这种曲率或者额外维。

如果这幅图像是正确的，对于有望成为空间旅行者的人来讲可是个坏消息：额外维实在是太小了，不允许宇宙飞船通过。然而，它也给科学家提出了一个重要问题：为何是一些而不是所有维都被卷曲成一个小球？也许在宇宙的极早期，所有的维一度非常弯曲。为何1个时间维和3个空间维被摊平开来，而其他的维仍然紧紧地卷曲着？

所谓的人存原理可能提供一个答案。人存原理可以释义为："我们看到的宇宙之所以是这个样子，那是因为我们存在。"人存原理有弱的和强的两种版本。弱人存原理是说，在一个空间和/或时间大的或者无限的宇宙里，只有在空间和时间有限的一定区域，才存在智慧生命发展的必要条件。因此，在这些区域中，如果智慧生物观察到它们在宇宙中的位置满足它们生存所需的那些条件，它们就不应感到惊讶。这有点像住在富裕街坊中的富人，看不到任何贫穷。

有的人走得远得多，并且提出这个原理的强版本。按照这个理论，要么存在许多不同的宇宙，要么存在一个单独宇宙的许多不同区域，每一个都有自己的初始结构，或许还有自己的一套科学定律。在这些宇宙的大多数中，不具备复杂机体发展的适当条件；只有在和我们相像的少数宇宙中，智慧生命才得以发展并能质疑："为何宇宙是我们看到的这种样子？"其答案很简单：如果它不是这个样子，我们就不会在这里！

很少人会对弱人存原理的成立或有效性提出异议，但是人们会对用强人存原理解释所观察到的宇宙状态提出一些反对的理由。例如，在何种意义上，我们可以说所有这些不同的宇宙存在？如果它们确实互相分离，那么在其他宇宙发生的事件，就不能在我们自己的宇宙中有任何可观测的后果。所以，我们应该用经济原理，将它们从理论中割除掉。另一方面，如果它们仅仅是一个单独宇宙的不同区域，则在每个区域里的科学定律必须是一样的，否则我们便不能从一个区域连续地运动到另一个区域。在这种情况下，不同区域的初始结构便是它们之间仅有的差

别。这样强人存原理即归结为弱人存原理。

为何弦论的额外维被卷曲起来，人存原理可能提供一个答案。二维空间似乎不足以允许像我们这样复杂的生命发展。例如，在一个圆周（一个二维地球的表面）上生活的二维动物为了互相通过，就必须一个爬到另一个之上。而且如果一个二维动物吃东西时不能将其完全消化，则它必须将其残渣从吞下食物的同一通道吐出来，因为如果有一个穿过全身的通道，它就将这动物分割成分开的两半：我们的二维动物就解体了。类似地，很难看出在二维动物身上怎么可能有血液循环。

多于3个空间维也有问题。两个物体之间的引力随距离衰减得将比在三维空间中更快。（在三维空间内，当你把距离加倍，则引力减小到1/4。在四维空间中减小到1/8，在五维空间中则为1/16，等等。）其意义在于使像地球这样围绕着太阳的行星的轨道变得不稳定：从圆周轨道的最小的偏离（比如由其他行星的引力吸引引起的）会使地球以螺旋线的轨道向外离开或者向内落到太阳上去。我们就要么会被冻死，要么会被烧死。事实上，在维数多于3的空间中，引力随距离变化的同样行为意味着，太阳不可能在压力和引力相平衡的一个稳定状态下存在。太阳要么被四分五裂，要么坍缩形成一个黑洞。在任一情况下，作为地球上生命的热和光的来源而言，它没有多大用处。在更小的尺度下，原子中使电子围绕着原子核转动的电力的行为也正和引力一样。这样，这些电子要么从原子核逃逸出去，要么以螺旋的轨道落到原子核内去。在任一情形下，我们所知道的原子都不会存在。

看来很清楚，至少正如我们所知，生命只能存在于1个时间维和刚好3个空间维没被卷曲得很小的时空区域里。这表明，只要我们可以证明弦论至少允许宇宙的这样的区域存在——看来弦论确实能做到这一点，我们便可以诉求弱人存原理。同样，也许存在宇宙的其他区域或其他宇宙（不管那是什么含意），那里所有的维都被卷曲得很小，或者多于四维是几乎平坦的。但在这样的区域里，不会有智慧生物去观察这不同数目的有效维。

除了维数的问题，弦论的另一个问题是，至少有5种不同的弦论（两种开弦和三种不同的闭弦理论））存在，而且弦论还预言，可以用极其繁多的方式卷曲额外维。为什么仅仅应该挑选一种弦论和一种卷曲方式？这问题一度似乎没有答案，因而无法向前进展。后来，大约从1994年起，人们开始发现所谓的对偶性：不同的弦论以及额外维的不同

卷曲方式会导致在四维时空中的同样结果。不仅如此，除了在空间占据一点的粒子，以及线状的弦，还发现了另一种称做p-膜的东西，它在空间占据二维或更高维的体积。（粒子可认为是0-膜，而弦为1-膜，但是还存在p＝2到p＝9的p-膜。2-膜可认为是像二维薄膜的某种东西。描绘更高维的膜更加困难。）这似乎表明，在超引力、弦以及p-膜理论中有某种民主（在拥有同等发言权的意义上）：它们似乎和平相处，没有一种声称比另一种更基本。相反，它们似乎都是对某种更基本的理论的不同近似，每一种理论在不同情形下成立。



空间是三维的重要性

在多于三维的空间中，行星轨道将是不稳定的，而行星要么以螺旋线的轨道向内落到太阳上去，要么完全逃脱它的吸引。

人们探索过这个基本理论，但是迄今毫无成就。正如哥德尔证明的不可能用单独的一组公理系统来表述算术一样，很可能类似地，基本理论的任何单独表述并不存在。相反，它也许和地图相像——你不可能只用一张单独的平面地图去描绘地球的球形表面或者锚圈的表面：对于地

球，你至少需要两张地图去覆盖每一点，而对于锚圈，则需要4张。每张地图只对一个有限的区域有效，但是不同的地图有一个交叠的区域。整套地图就完整地描述了该表面。类似地，在物理学中对不同的情形也许需要使用不同的表述，但是两种不同表述在它们都应用的情形下要相互一致。

如果情形果真如此，则整套不同的表述可以被认为是完备的统一理论，尽管它不再是能够依照单独的一组假设来表达的理论。但是，也许自然苛刻得连这个也不容许。可能根本就没有统一理论？也许我们仅仅是在追求海市蜃楼？看来有三种可能性：

1..确实存在一个完备的统一理论（或者一堆交叠的表述），如果我们足够聪明的话，总有一天将会找到它。

2..并不存在宇宙的终极理论，仅仅存在一个越来越精密，但绝不可能完全准确地描述宇宙的无限的理论序列。

3..并不存在宇宙的理论：事件在一定程度之外不可能被预言，仅仅是以一种随机和任意的方式发生。

有些人基于以下理由赞同第三种可能性，如果存在一套完备的定律，这将侵犯上帝改变其主意并对世界进行干涉的自由。然而，既然上帝是无所不能的，如果上帝乐意的话，难道他就不能侵犯他自己的自由吗？这有点像那古老的二律背反：上帝能制造一块重到连他都不能举起的石头吗？上帝想要改变他主意的思想，实际上，正如圣·奥古斯丁指出的，是把上帝想象成存在于时间中的生物的谬误的例子。时间只不过是上帝创造的宇宙的一个性质。可以设想，当他创造宇宙时，知道自己所有的企图！

随着量子力学的出现，我们认识到，由于总有一定程度的不确定性，所以不可能完全精确地预言事件。如果你愿意，你可以将此随机性归结为上帝的干涉。但这将是一种非常奇怪的干涉，没有任何证据表明它具有任何目的。的确，如果它有目的，则按定义就不会是随机的。当今，由于我们重新定义科学的目标，所以已经有效地排除了上述的第三种可能性：我们的目的是表述一套定律，这些定律使我们能够只在不确定性原理设定下的界限之内预言事件。

第二种可能性，也就是存在一个无限的越来越精制的理论序列，这和我们迄今为止的所有经验相符合。我们在许多场合增加了测量的灵敏度，或者进行了新的类型的观测，只是为了发现还没被现有理论预言的

新现象，而为了解释这些，我们必须发展更高级的理论。从研究以越来越高能量相互作用的粒子，我们也许真的可以期待找到比我们现在以为是“基本”粒子的夸克和电子更基本的新结构层次。

引力可以为这个“盒子套盒子”的序列提供极限。如果我们有一个能量比称做普朗克能量更高的粒子，其质量就会集中到如此程度，以至于它自身会脱离宇宙的其他部分，而形成一个小黑洞。这样看来，当我们往越来越高的能量去的时候，越来越精制的理论序列应当有某个极限，于是一定存在宇宙的某种终极理论。可是，目前我们在实验室中可产生的最大能量离普朗克能量还非常远。我们不可能在可见的未来用粒子加速器填补其间的差距。然而，宇宙的极早期阶段正是这样大的能量应该出现过的舞台。早期宇宙的研究和数学一致性的要求，很有可能会使我们中的某些人在有生之年获得一个完备的统一理论。当然，这一切都有个前提，即我们不首先使自身毁灭！

如果我们确实发现了宇宙的终极理论，这意味着什么？

正如在第3章解释过的，我们将永远不能完全肯定，我们是否确实找到了正确的理论，因为理论不能被证明。但是如果理论在数学上是协调的，并且总是给出与观察一致的预言，我们便有理由相信它是正确的。它将为一个光辉的篇章打上一个休止符，那是人类智慧为理解宇宙的斗争的长期历史。但是，它还会变革常人对制约宇宙定律的理解。

在牛顿时代，一个受过教育的人至少在梗概上能够掌握人类知识的整体。但从那以后，科学发展的步伐使之不再可能。因为理论总是被改变以解释新的观测，它们从未被适当地消化或简化到使常人能够理解。你必须是一个专家，即便如此，你只能希望适当地掌握科学理论的一小部分。此外，科学进步的速度如此之快，以至于在中学和大学所学的东西总是有些过时。只有很少人可以跟得上知识快速进步的前沿，但他们必须贡献全部的时间，并且局限在一个很小的领域里。其余的人对于正在做出的进展或其引发的激动，所知甚少。另一方面，70年以前，如果爱丁顿的话是可信的，那么只有两个人理解广义相对论。今天，成千上万的大学毕业生能理解，并且几百万人至少熟悉这种思想。如果科学家发现了一套完备的统一理论，以同样方法将其消化并简化，在学校中至少讲授其梗概，则只是迟早的问题。那时我们大家就都能够对制约宇宙并对我们的存在负责的定律有所理解。

即使我们发现了一套完备的统一理论，但由于两个原因，这并不表明我们能够一般性地预言事件。第一是量子力学的不确定性原理给我们的预言能力设立的限制，对此我们无法克服。然而，比第一个限制更为严厉的实际上是第二个限制。这是由以下的事实引起的，除了非常简单的情形，我们多半不能准确解出这样一种理论的方程。正如我们说过的，对于包含一个核与多于一个电子的原子，无人能够准确地解出其量子方程。甚至在像牛顿引力论这么简单的理论中，我们都不能准确地求解三体的运动，而且随着物体的数目和理论复杂性的增加，困难越来越大。近似解对于应用通常已经足够了，但是它们和“万物统一理论”这一术语激起的伟大期望毫不匹配！

今天，除了在最极端条件下以外，我们已经知道规范物体在所有条件下的行为的定律。特别是，我们已知道作为所有化学和生物的基础的基本定律。然而，我们肯定还不能将这些学科归于已解决的问题的地位。而且我们用数学方程来预言人类行为成效甚微！所以，即使我们确实找到了基本定律的完备集合，在未来的岁月里，我们仍面临着在智慧上挑战性的任务，那就是发展更好的近似方法，使得在复杂而现实的情形下，能够做出对可能结果的有用预言。一个完备的协调的统一理论只是第一步：我们的目标是完全理解我们周围的事件以及我们自身的存在。

·第12章·
结论

我们发现自己处于令人困惑的世界中。我们要理解周围所看到的一切的含义，并且询问：宇宙的本质是什么？我们在其中的位置如何，以及宇宙和我们从何而来？宇宙为何是这个样子？

我们试图采用某些世界之图来回答这些问题。恰如一个无限的乌龟塔背负平坦的地球是这样的图像一样，超弦理论也是一种图。虽然后者比前者更数学化，更准确得多，但两者都是宇宙的理论。两个理论都缺乏观测的证据：没人看到一个背负地球的巨龟，但也没有人看到超弦。然而，龟理论作为一个好的科学理论是不够格的，因为它预言了人会从世界的边缘掉下去。除非可以用它解释人们在百慕大三角消失的传说，否则这个理论和经验不一致！

最早在理论上描述和解释宇宙的企图牵涉到这样的一个思想：具备人类情感的灵魂控制着事件和自然现象，它们的行为和人类非常相像，并且是不可预言的。这些灵魂栖息在自然物体，诸如河流、山岳以及包括太阳和月亮这样的天体之中。我们必须向它们祈祷并供奉，以保证土壤肥沃和四季循环。然而，我们逐渐注意到一些规律：太阳总是东升西落，而不管我们是否用牺牲向太阳神供奉。此外，太阳、月亮和行星沿着可事先被预言得相当准确的轨道穿越天穹。太阳和月亮仍然可以是神祇，只不过是服从严格定律的神祇。如果人们不把为约书亚停止太阳运行之类的神话当真，则这一切显然是毫无例外的。




从乌龟塔到弯曲空间

古代和现代宇宙观。

最初，只有在天文学和其他一些情形下，这些规律和定律才是显而易见的。然而，随着文明的发展，特别是近300年间，越来越多的规律和定律得到发现。这些定律的成功，使得拉普拉斯在19世纪初提出科学的决定论；也就是说，他认为，存在一族定律，只要给定宇宙在某一时刻的状态，这些定律就能精确决定宇宙的演化。

拉普拉斯的决定论在两个方面是不完整的：它没讲应该如何选择定律，也没指定宇宙的初始状态。这些都留给了上帝。上帝会选择让宇宙如何开始并要服从什么定律，但是一旦开始之后，他将不再干涉宇宙。事实上，上帝被局限于19世纪科学不能理解的领域里。

我们现在知道，拉普拉斯对决定论的希望，至少按照他所想的方式，是不能实现的。量子力学的不确定性原理意味着，某些成对的量，比如粒子的位置和速度，不能同时被完全精确地预言。量子力学通过一类量子理论来处理这种情形，在这些理论中粒子没有精确定义的位置和速度，而是由一个波来代表。这些量子理论给出了波随时间演化的定律，在这种意义上，它们是决定论的。于是，如果我们知道某一时刻的波，我们便可以将它在任一时刻推算出。只是当我们试图按照粒子的位置和速度对波做解释的时候，不可预见性的随机的要素才出现。但这也许是我们的错误：也许不存在粒子的位置和速度，只有波。只不过是我们企图将波硬套到我们关于位置和速度的先入为主的观念之上而已。由此导致的不协调乃是表面上不可预见性的原因。

事实上，我们已经将科学的任务重新定义为发现定律，这些定律使我们能在由不确定性原理设定的界限内预言事件。然而，仍然存在问题：如何或者为何选取宇宙的定律和初始状态？

本书特地突出制约引力的定律，因为正是引力使宇宙的大尺度结构成形，即使它是4类力中最弱的一种。引力定律和直到相当近代还为人深信的宇宙在时间中不变的观念不相协调：引力总是吸引，这一事实意味着，宇宙的演化方式两者必居其一，要么正在膨胀，要么正在收缩。按照广义相对论，宇宙在过去某一时刻肯定有一个具有无限密度的状态，亦即大爆炸，这是时间的有效起始。类似地，如果整个宇宙坍缩，在将来必有另一个无限密度的状态，亦即大挤压，这是时间的终结。即使整个宇宙不坍缩，在任何坍缩形成黑洞的局部区域里都会有奇点。这些奇点正是任何落进黑洞的人的时间终点。在大爆炸时和其他奇点，所有定律都失效，所以上帝仍然有完全的自由去选择发生了什么以及宇宙如何开始。

当我们将量子力学和广义相对论结合，似乎产生了前所未有的新的可能性：空间和时间一起可以形成一个有限的四维的没有奇点或边界的空间，这正如地球的表面，但具有更多的维。看来这种思想能够解释宇宙间已观察到的许多特征，诸如它的大尺度一致性，还有包括星系、恒星甚至人类等在小尺度上对此均匀性的偏离。但是，如果宇宙是完全自足的，没有奇点或边界，并且由统一理论完全描述，那么就对上帝作为造物主的作用有深远的含义。

有一次爱因斯坦问道："在建造宇宙时上帝有多少选择性？"如果无边界假设是正确的，上帝就根本没有选择初始条件的自由。当然，上帝仍有选择宇宙所服从的定律的自由。然而，这也许实在并没有那么多选择性；很可能只有一个或数目很少的完备的统一理论，例如弦论，它们是自洽的，并且允许像人类那样复杂结构的存在，这些结构能够研究宇宙定律并询问上帝的本性。

即使只有一种可能的统一理论，那也只不过是一组规则和方程而已。是什么赋予这些方程以活力去制造一个为它们所描述的宇宙呢？通常构造一个数学模型的科学方法不能回答为什么会有一个为此模型所描述的宇宙这个问题。为什么宇宙要克服这么多麻烦以获取存在？难道统一理论如此咄咄逼人，以至于其自身之实现不可避免？或者它需要一个造物主，若是这样，它对宇宙还有其他效应吗？又是谁创造了它？

迄今为止，大部分科学家太忙于发展描述宇宙为何物的理论，以至于没工夫过问为什么。另一方面，以寻根究底为己任的哲学家跟不上科学理论的进步。18世纪，哲学家把包括科学在内的整个人类知识当做他

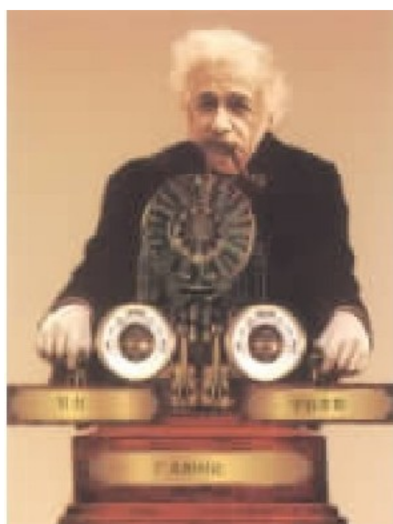
们的领域，并讨论诸如宇宙有无开端的问题。然而，19世纪和20世纪，对哲学家或除了少数专家以外的任何人来说，科学变得过于专业化和数学化了。哲学家把他们的质疑范围缩小到如此程度，以至于连维特根斯坦，这位20世纪最著名的哲学家都说道："哲学余下的任务仅是语言分析。"这是从亚里士多德到康德伟大哲学传统的何等的堕落啊！

如果我们确实发现了一个完备的理论，在广泛的原理上，它应该及时让所有人理解，而不仅仅让几个科学家理解。那时我们所有人，包括哲学家、科学家以及普普通通的人，都能参与讨论我们和宇宙为什么存在的问题。如果我们对此找到了答案，那将是人类理性的终极胜利——因为那时我们知道了上帝的精神。

·阿尔伯特·爱因斯坦·

爱因斯坦与核弹政治的瓜葛是众所周知的：他签署了那封著名的致富兰克林·罗斯福总统的信，说服美国认真考虑他的想法，并且在战后致力于阻止核战争的爆发。但是，这些不仅仅是一位科学家被拖入政界的孤立行动。事实上，用爱因斯坦自己的话来说，他的一生“一半用于政治，一半用于方程”。

爱因斯坦最早从事政治活动是在第一次世界大战期间，当时他在柏林当教授。由于目睹草菅人命而不胜厌恶，他卷入了反战示威。他拥护非暴力反抗以及公开鼓励人民拒绝服兵役，因而不受他的同事们欢迎。后来，在战时，他又致力于调解和改善国际关系。这也使他不受欢迎，而且他的政治态度很快使他难以访问美国，甚至连讲学都有困难。



爱因斯坦第二个伟大的事业是犹太复国主义。虽然他在血统上是犹太人，但他拒绝接受《圣经》上关于上帝的说法。然而，在第一次世界大战之前和期间，他越发看清反犹主义，这导致他逐渐认同犹太团体，

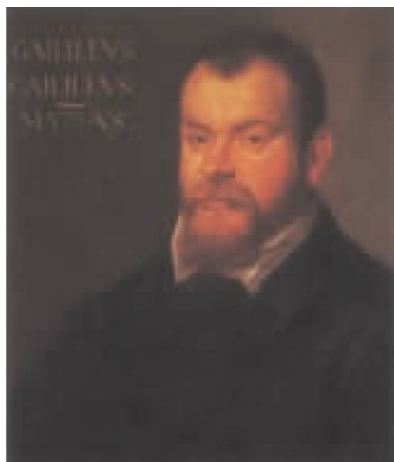
而后成为一个直言不讳的犹太复国主义的拥护者。再度不受欢迎也未能阻止他发表自己的主张。他的理论开始受到攻击，甚至有人成立了一个反爱因斯坦的组织。有一个人因教唆他人去谋杀爱因斯坦而被定罪（却只罚了6美金）。但爱因斯坦是冷静的。当一本题为《100个反爱因斯坦的作家》的书出版时，他反驳道："如果真是我错了的话，有一个人反对我就足够了！"

1933年，希特勒上台了。爱因斯坦正在美国，他宣布不再回德国。后来纳粹冲锋队查抄了他的房子，并没收了他的银行存款。一家柏林报纸的头条写道："来自爱因斯坦的好消息——他不回来了。"面对纳粹的威胁，爱因斯坦放弃了和平主义，由于担心德国科学家会制造核弹，他终于建议美国应该发展自己的核弹。但是，甚至在第一枚原子弹爆炸之前，他就曾经公开警告过核战争的危险，并提议对核武器进行国际控制。

终其一生，爱因斯坦致力于和平的努力可能成效甚微——肯定不受欢迎。然而，1952年他得到担任以色列总统的提议，他对犹太复国主义事业的畅言无忌的支持得到了充分的承认。但他谢绝了。他说他认为自己在政治上过于天真。可是，也许他真正的理由却并非如此，再次引用他自己的话："方程对我而言更重要些，因为政治是为当前，而方程却是永恒的东西。"

·伽利略·伽利雷·

伽利略可能比任何其他人更有资格称为近代科学的奠基人。他与天主教会名闻遐迩的冲突对他的哲学是极重要的，因为伽利略是最早做出如下论断的人之一：人类有望理解世界如何行为，而且我们能通过观察现实世界来做到这一点。伽利略很早就相信哥白尼理论（即行星围绕太阳公转），但只有当他发现了支持这一观念的证据后，才公开支持。他用意大利文写有关哥白尼理论的文章（没有用通常的学院式拉丁文），并且他的观点很快就广泛地传播到大学之外。这惹怒了亚里士多德派的教授们，他们联合起来反对他，并极力说服天主教会禁止哥白尼主义。



伽利略为此担心，他赶到罗马去向天主教会当局当面申诉。他争辩道，《圣经》并不试图告诉我们任何科学理论，而且通常都是假定，在《圣经》和常识发生矛盾的地方，《圣经》是以讽喻的方式叙述的。

但是教会害怕这样的丑闻可能削弱它对新教的斗争，所以采取了镇压的手段。1616年，天主教会宣布哥白尼主义是“虚假的和错误的”，并命令伽利略再也不准“保卫或坚持”这一学说。伽利略勉强接受了。

1623年，伽利略的一位老友成为教皇，伽利略立即试图为1616年的判决翻案。他失败了，但他设法获得了准许，在两个前提下写一本讨论亚里士多德和哥白尼理论的书：他不能有倾向，同时要得出结论，无论如何人不能确定世界是如何运行的，因为上帝会以人难以想象的方式来达到同样的效果，而人类不能限制上帝的万能。

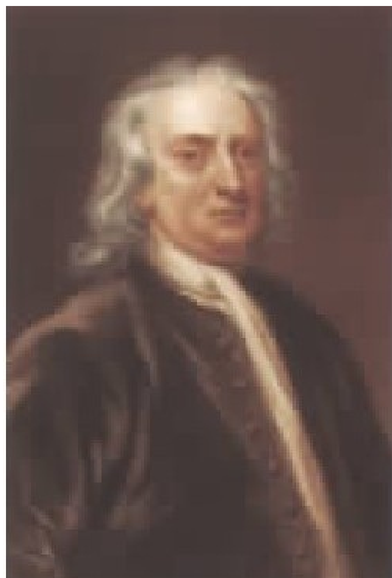
这本题为《关于两大世界体系的对话》的书，于1632年在审查官的全力支持下完成并出版了——并且立刻被全欧洲欢呼为文学和哲学的杰作。不久教皇就意识到，人们把这本书视为拥护哥白尼主义的令人信服的论证，后悔允许该书出版。教皇指出，虽有审查官正式批准出版该书，但伽利略依然违背了1616年的禁令。他把伽利略带到宗教法庭，宣布对他终身软禁，并命令他公开放弃哥白尼主义。伽利略第二次被迫服从。

伽利略仍然是一个忠实的天主教徒，但是他对科学独立的信仰从未动摇过。1642年，即他逝世前4年，当时他仍然被软禁着，他第二本主要著作的手稿被偷运给一个荷兰的出版商。正是这本被称为《两种新科学》的书，甚至比支持哥白尼更进一步，成为现代物理学的发端。

·艾萨克·牛顿·

艾萨克·牛顿是一个不讨人喜欢的人。他和其他院士的关系声名狼藉。他在激烈的争吵中度过晚年的大部分时间。随着那部肯定是物理学有史以来最有影响的书——《自然哲学的数学原理》的出版，牛顿很快就成为名重一时的人物。他被任命为皇家学会主席，并成为第一个被授予爵位的科学家。

不久，牛顿就与皇家天文学家约翰·夫莱姆斯梯德发生冲突。他起初曾为牛顿《自然哲学的数学原理》一书提供急需的数据，但是他后来却扣压了牛顿需要的资料。牛顿是不许别人回答“不”字的，他自封为皇家天文台的大总管，然后强迫立即公布这些数据。最后，他指使夫莱姆斯梯德的冤家对头爱德蒙·哈雷夺取夫莱姆斯梯德的工作成果，并且准备出版。可是夫莱姆斯梯德告到法庭去，在最紧要关头赢得了法庭的判决——不得发行这部剽窃的著作。牛顿被激怒了，作为报复，他在《自然哲学的数学原理》后来的版本中系统地删除了所有来自夫莱姆斯梯德的引证。



他和德国哲学家哥特夫瑞德·莱布尼茨之间发生了更严重的争论。莱布尼茨和牛顿各自独立地发展了称做微积分的数学分支，它是大部分近代物理的基础。虽然现在我们知道，牛顿发现微积分要比莱布尼茨早若干年，可是他比莱布尼茨晚很久才出版他的著作。于是发生了关于谁是第一个发现者的大争吵，科学家们激烈地为双方做辩护。然而值得注意的是，大多数为牛顿辩护的文章均出自牛顿本人之手，虽然是以他朋友的名义出版！当争论日趋激烈时，莱布尼茨犯了向皇家学会起诉来解决争端的错误。牛顿作为其主席，指定一个清一色的由牛顿的朋友组成的“公正的”委员会来审查此案！更有甚者，牛顿后来自己写了一个委员会报告，并让皇家学会将其出版，正式地谴责莱布尼茨的剽窃行为。即便如此，牛顿心犹未足，他又在皇家学会的杂志上写了一篇匿名的、关于该报告的回顾。据报道，莱布尼茨死后，牛顿扬言他为“伤透了莱布尼茨的心”而洋洋得意。

在这两次争吵期间，牛顿已经离开剑桥和学术界。在剑桥他曾积极从事反天主教政治，后来在议会中也很活跃。最终，作为酬报，他得到皇家造币厂厂长的肥差。在这里，他以社会上更能接受的方式，施展他那狡猾和刻薄的能耐，成功地导演了一场反对伪币的重大战役，甚至将几个人送上了绞刑架。

·小辞典·

绝对零度：所能达到的最低温度，在此温度下物体没有热能。

加速度：物体速度改变的速率。

人存原理：我们之所以看到宇宙是这个样子，是因为如果它不是这样的话，我们就不会在这里去观察它。

反粒子：每个类型的物质粒子都有相对应的反粒子。当一个粒子和它的反粒子碰撞时，两者就湮灭，只留下能量。

原子：通常物质的基本单元，是由很小的核子（由质子和中子组成）以及围绕着它转动的电子构成。

大爆炸：宇宙开端的奇点。

大挤压：宇宙终结的奇点。

黑洞：时空的一个区域，因为那里的引力是如此之强，以至于任何东西，甚至光都不能从该处逃逸出来。

坐标：指定时空中一点的位置的一组数。

宇宙常数：爱因斯坦使用的一个数学手段，它赋予时空一个嵌入的膨胀倾向。

宇宙学：对整个宇宙的研究。

暗物质：在星系、星系团以及可能在星系团之间的物质，这种物质不能直接被观测到，但是可以由它的引力效应被检测到，宇宙中的质量多达90%可能处于暗物质的形式。

对偶性：导致相同的物理结果的，表面上不同的理论之间的对应。

爱因斯坦-罗森桥：连接两个黑洞的时空的细管。还请参见虫洞。

电荷：粒子的一个性质，由于这性质粒子排斥（或吸引）其他带有相同（或相反）符号电荷的粒子。

电磁力：在带电荷的粒子之间引起的力；它是四种基本力中第二强的力。

电子：带有负电荷并围绕着原子核转动的粒子。

弱电统一能量：大约为100吉电子伏的能量，在比这能量更大时，电磁力和弱力之间的差别消失。

基本粒子：被认为不可再分的粒子。

事件：由它的时间和位置所指明的在时空中的点。

事件视界：黑洞的边界。

场：某种充满空间和时间的东西，与它相反的是在一个时刻只在一点存在的粒子。

频率：对一个波而言，在1秒内完整循环的次数。

伽马射线：波长非常短的电磁射线，是由放射性衰变或由基本粒子碰撞产生的。

广义相对论：爱因斯坦基于如下思想的理论，即科学定律对所有的观察者，不管他们如何运动，都必须是相同的。它将引力解释成四维时空的曲率。

测地线：两点之间最短（或最长）的路径。

大统一理论（GUT）：一种统一电磁力、强力和弱力的理论。

光秒（光年）：光在1秒（1年）的时间里走过的距离。

磁场：引起磁力的场，现在和电场合并成电磁场。

质量：物体中物质的量；它的惯性或对加速的抵抗。

微波背景辐射：起源于炽热的早期宇宙的灼热的辐射，现在它受到如此大的红移，以至于不以光而以微波（波长为几厘米的射电波）的形式呈现出来。

中微子：只受弱力和引力影响的极轻的粒子。

中子：一种和质子非常类似的但不带电荷的粒子，在大多数原子的核中大约一半的粒子是中子。

中子星：在超新星爆发后，有时一个恒星中心的物质的核坍缩成一团密集的中子，这种余下的冷的恒星称做中子星。

无边界条件：宇宙是有限的但是没有边界的思想。

核聚变：两个核碰撞并合并形成单独的更重的核的过程。

核：原子的中心部分，只包括由强作用力将其束缚在一起的质子和中子。

粒子加速器：一种利用电磁铁能够对运动的带电粒子加速，给它们更多能量的机器。

相位：对一个波，特定的时刻在它循环中的位置：一种它是否在波峰、波谷或它们之间的某点的标度。

光子：光的一个量子。

普朗克量子原理：光（或任何其他经典的波）只能被发射或吸收分立的量子，其能量与它们的频率呈正比，和它们的波长呈反比的思想。

正电子：电子的（带正电荷的）反粒子。

比例：“XXX正比于Y”，表示当Y被乘以任何数时，X也如此；“X反比于YX”，表示当Y被乘以任何数时，X被那个数除。

质子：一种和中子非常类似的但带正电荷的粒子，在大多数原子的核中大约一半的粒子是质子。

量子力学：从普朗克量子原理和海森伯不确定性原理发展而来的理论。

夸克：感受强作用力的（带电的）基本粒子。每一个质子和中子都由3个夸克组成。

雷达：利用脉冲射电波的单独脉冲到达目标并折回的时间间隔来测量对象位置的系统。

放射性：一种类型的原子核自动分裂成其他类型的原子核。

红移：由于多普勒效应，从离开我们而去的恒星发出的光线的红化。

奇点：时空中的一点，在该处时空曲率（或者一些其他的物理量）变得无限大。

时空：四维的空间，上面的点是事件。

空间维：三维中的任何一维——也就是除了时间维外的任何一维。

狭义相对论：爱因斯坦的基于如下思想的理论，即科学定律在没有引力现象时，对所有进行自由运动的观察者，无论他们的运动速度如何，都必须相同。

谱：构成一个波的分频率。太阳谱的可见光部分可以在彩虹中看见。

弦论：物理学的理论，在该理论中粒子被描述成弦上的波。弦具有长度，但没有其他维。

强力：4种基本力中最强的，作用距离最短的一种力。它在质子和中子中将夸克束缚在一起，并将质子和中子束缚在一起形成原子核。

不确定性原理：海森伯表述的一个原理，该原理说，人们永远不能够精确地同时知道粒子的位置和速度；对其中的一个知道得越精确，则对另外一个就知道得越不精确。

虚粒子：在量子力学中，一种永远不能直接检测到的，但其存在确实具有可测量效应的粒子。

波/粒二象性：量子力学中的概念，认为在波和粒子之间没有区别；粒子有时可以像波一样行为，而波有时可以像粒子一样行为。

波长：在一个波中，两个相邻波谷或波峰之间的距离。

弱力：4种基本力中仅次于引力的第二弱的，作用距离非常短的一种力。它作用于所有物质粒子，而不作用于携带力的粒子。

重量：引力场作用在物体上的力。它和质量呈正比，但又不同于质量。

虫洞：连结宇宙的遥远区域的时空细管。虫洞还可以联结到平行或婴儿宇宙，并且能够提供时间旅行的可能性。

·致谢·

我们对以下各位表示诚挚的感谢：我们的编辑，班坦姆出版社的安·哈里斯。借助于她丰富的经验和卓越的才能，我们才能使手稿精益求精。班坦姆出版社的艺术总监格伦·埃德尔斯坦为本书花费了大量心血。我们的艺术团队菲利普·杜恩、詹姆斯·张和基斯·维宁玻斯。他们花时间学习物理，进而在不损害物理内容的前提下，把这本书做得光彩夺目。我们的代理人，作者之家的阿尔·朱克曼和苏珊·金斯堡贡献了他们的智慧、关心和支持，莫尼卡·盖伊进行了校对。还有那些在我们追求明晰的过程中，热心地阅读不同阶段的手稿的各位。他们是：多娜·斯各特、阿列克塞·蒙洛迪诺、尼古拉·蒙洛迪诺、马克·希勒里、约书亚·韦伯曼、史蒂芬·尤拉、罗伯特·巴科维奇、马莎·娄特、凯瑟琳·玻尔、阿曼达·伯根、杰弗里·玻依默、金伯利·柯默、彼德·库克、马修·狄金森、德鲁·多诺瓦尼克、大卫·弗拉林格、伊林诺·格鲁瓦尔、艾丽西娅·金斯敦、维克多·拉蒙德、迈克尔·梅尔顿、米克尔·穆伦、马修·里查兹、米歇尔·罗斯、萨拉·斯米特、柯提斯·西蒙斯、克里斯廷·韦伯和克里斯托弗·赖特。

THE UNIVERSE IN A NUTSHELL

果壳中的宇宙



STEPHEN HAWKING

史蒂芬 霍金/著 吴忠超/译

湖南科学技术出版社

版权信息

The Universe in A Nutshell

Copyright ©2001 by Stephen Hawking.

Original illustrations copyright © 2001 by Moonrunner Design Ltd. UK and The Book laboratory™ Inc. Published by arrangement with Writer's House. LLC.

Through Bardon-Chinese Media Agency.

All Right Reserved.

湖南科学技术出版社通过台湾博达著作权代理公司获得本书中文简体版中国大陆地区独家出版发行权。

版权登记号：18-2001-66

版权所有，侵权必究。

果壳中的宇宙/（英）霍金（HaWking, S.）著；吴忠超译.——长沙：湖南科学技术出版社，2006（2009.12重印）

ISBN 978-7-5357-3359-7

I.时… II.①霍…②吴… III.宇宙学-普及读物 IV.P159-49

中国版本图书馆CIP数据核字（2009）第200741号

果壳中的宇宙

著　　者：史蒂芬·霍金

译　　者：吴忠超

责任编辑：孙桂均

文字编辑：陈一心

出版发行：湖南科学技术出版社

社　　址：长沙市湘雅路276号

http：//www.hnstp.com

邮购联系：本社直销科0731-84375808

印　　刷：湖南天闻新华印务有限公司

（印装质量问题请直接与本厂联系）

厂　　址：湖南望城·湖南出版科技园

邮　　编：410219

出版日期：2015年7月第1版第35次

开　　本：710mm×970mm 1/16

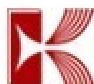
印　　张：13.25

字　　数：171000

书　　号：ISBN 978-7-5357-3359-7

定　　价：42.00元

（版权所有·翻印必究）



湖南科学技术出版社
HUNAN SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS

目录

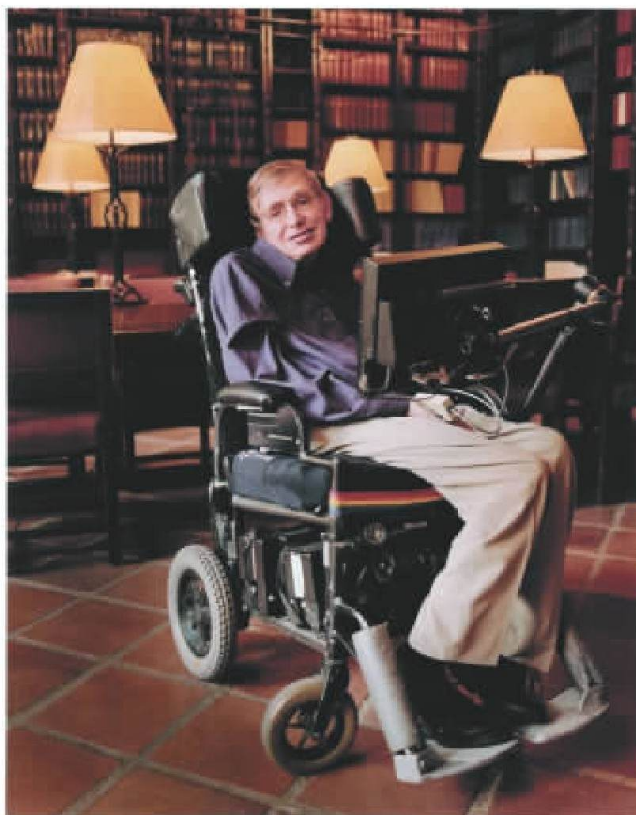
版权信息
译者序
前言
第一章 相对论简史
第二章 时间的形状
第三章 果壳中的宇宙
第四章 预言未来
第五章 护卫过去
第六章 我们的未来？“星际航行”可行吗？
第七章 膜的新奇世界

史蒂芬·霍金给中国读者的寄语：

我愿意和中国读者分享对黑洞和宇宙学中最近发现的激动。

——史蒂芬·霍金

史蒂芬·霍金于2001年，Stewart Cohen摄。



1

译者序

《果壳中的宇宙》这一书名出自于莎士比亚名剧《哈姆雷特》。它的隐喻是如此之重。哈姆雷特认为，即便把他关在果壳中，仍然自以为是无限空间之王。

哈姆雷特几百年前所吟唱的处境，却和人类的宇宙观完全相符。这当然要归功于莎士比亚敏锐的洞察力。在那个境界上艺术和科学是相通的。从广义上看，粒子、生命和星体的处境都和果壳相似，尚不清楚的是它们中有哪些自认为是无限空间之王。

现代量子宇宙学认为，整个宇宙是由一个果壳状的瞬子演化而来，果壳上的量子皱纹包含着宇宙中所有结构的密码。本书作者是这一学说的开创者。

史蒂芬·霍金，这位被禁锢在轮椅上近40年的最富有创见的科学巨人，一定比他的任何同类更深切地将这几行诗引为肺腑之言。否则的话，何以从卷帙浩繁的莎士比亚剧作中特地将其挑选出作为书名呢？可以断言，一切有志创造的人们都可以从他这部自《时间简史》以来最重要的著作中汲取灵感。

这本书将以包括英文、中文等十几种主要文字在全世界同步发行。译者在首次阅读其电子文本时，获得一种感觉，犹如在攀登高山一样，开阔的视野仿佛九叠画屏[1]般在眼前渐次展开，而这个视野不是别的，正是科学的前沿。

我曾经请霍金为中文版写点什么。在此书印发前夕，他将对中国读者的寄语传给我，全文如下：

I would like to share my excitement at recent discoveries on black holes and cosmology with Chinese readers.

Professor Stephen Hawking, CH,CBE,FRS,

Lucasian Professor of Mathematics

University of Cambridge

19 th September 2001

庐山的如琴湖畔提供了当今已经非常稀罕的清静，使我在一个多月内得以专心译述。窗外云雾晴岚、朝晖夕霞瞬息变幻。奇峰异壑、飞瀑流泉间遍布着王羲之、慧远、陶潜、李白、白居易、苏轼和王阳明的遗迹，这一切予人以无限的想象空间。在这种氛围中思索宇宙是再惬意不过的了。

在此期间曾得到许多友人的帮助和支持。他们是杜欣欣、陈佳安和林岚。他们也是这份译稿的首批读者和批评者。志此纪念。

吴忠超

2001年7月15日记于庐山花径

2001年9月22日补记于望湖楼

前言

我从未预料到我的科普著作《时间简史》获得如此成功。它荣登伦敦《星期日时报》畅销书榜达四年之久，比任何一本书都长，尤其是对于一本不易读懂的科学书而言，更加令人印象深刻。随后，人们不断地询问我何时写一本续集。由于我不想写《简史之子》或者《时间的稍长历史》，也由于我忙于研究，所以没有顺从。但是，我已意识到，有必要撰写一本也许更易理解的有别于《时间简史》的书。《时间简史》是具有线性方式结构的书，其大多数章节在逻辑上依赖于前面的章节。这很符合一些读者的口味，但是有的读者在阅读时，一旦在前面章节停顿，就无缘领略后续的更激动人心的内容。相反地，本书的结构更像一棵树：第一章和第二章是主干，从主干上分支出其余各章。

分支的各章相互之间比较独立，在主干的两章之后可以随意选读。它们对应于我在《时间简史》出版之后研究或思索过的领域。这样，它们呈现了当代研究的某些最活跃领域的图像。在每一章中我也尽力避免单独的线性结构。如同1996年出版的《时间简史》插图本，本书插图及其说明形成了正文之外的另一个脉络，而且框中文字或者边注，将给读者提供深入了解某些课题的机会，这单靠正文是无法做到的。

当1988年《时间简史》初版时，万物的终极理论似乎已经在望了。从那时开始情形发生了什么变化呢？我们是否更接近目标？正如在本书将要描述的，从那时到现在我们又走了很长的路。但是，这仍然是一条蜿蜒的路途，而且其终点仍未在望。正如古老谚语所说的，充满希望的旅途胜过终点的到达。我们追求发现，不仅是在科学中，而且是在所有领域中激起创造性。如果我们已经抵达终点，则人类精神将枯萎死亡。但我认为，我们将永远不会停止：我们若不更加深邃，定将更加复杂。我们将永远处于可能性的膨胀的视界之中心。

我愿意将我对正在进行的发现，以及正在涌现的实在的图像之激情和大家分享。因为情感上的直接我更专注于自己研究的领域。这研究的细节是非常技术性的，但是我坚信不需要数学理论即可以传达其广阔的观念。但愿我能成功。

我在撰写此书时得到了大量帮助。托玛斯·赫托格和尼尔·席尔勒帮助我作图、撰写说明和框中文字；安·哈里斯和吉蒂·佛古逊为我编辑手稿穴或者更准确地讲，应为电脑文件。因为我所写的一切都是电子的雪；还有书籍实验室和奔月设计公司的菲利普·丹创作了插图。此外，我要感谢所有让我能过上相当正常生活并从事科学研究的人们。没有他们此书便不能问世。

史蒂芬·霍金

2001年5月2日　剑桥

第一章
相对论简史

爱因斯坦是如何为20世纪两个基本理论，即相对论和量子论奠基的。

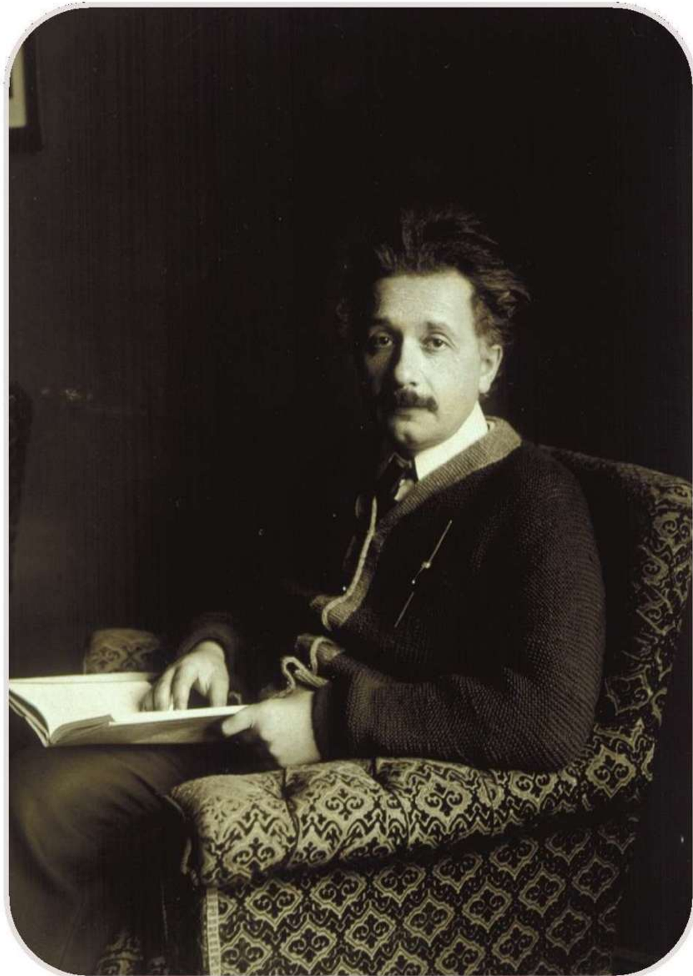


阿尔伯特·爱因斯坦，这位狭义和广义相对论的发现者，1879年诞生于德国的乌尔姆。次年他的全家即迁往慕尼黑。在那里他的父亲赫曼和叔父雅各伯建立了一个小型的不很成功的电器公司。阿尔伯特并非神童，但是宣称他在学校中成绩劣等似乎又过甚其辞。1894年他父亲的公

司倒闭，全家又迁往米兰。他的父母决定让他留在慕尼黑，以便完成中学学业，但是他讨厌其独裁主义，不过几个月他就离开了，前往意大利与家人团聚。后来他在苏黎世完成了学业，于1900年从著名的称为ETH的联邦高等工业学校毕业。ETH的教授们不喜欢他好辩的性格以及对权威的蔑视，他们中无人愿意雇他为助手，而这恰恰是进入学术生涯的正常途径。两年之后，他终于在伯尔尼的瑞士专利局谋得一个低级职位。1905年正是在专利局任上，他写了三篇论文。这三篇论文不仅奠定了他作为世界最主要科学家之一的地位，而且开启了两项观念革命，这革命改变了我们对时间、空间以及实在本身的理解。

在19世纪末，科学家们相信他们已经处于完整描述宇宙的前夕。他们想象空间充满了所谓“以太”的连续介质。光线和射电讯号是在以太中的波动，如同声音为空气中的压力波一样。完整理论所需要的一切只不过是要仔细测量以太的弹性性质。事实上，为了进行这种测量，哈佛大学建立了杰弗逊实验室。整个建筑物不用任何铁钉，以免干扰灵敏的磁测量。然而策划者忘记了构筑实验室和哈佛大部分楼房的褐红色砖头含有大量的铁。这座建筑迄今仍在使用，虽然哈佛仍然不清楚，不用铁钉的图书馆地板究竟可以支撑多少卷藏书。

到了世纪之末，开始出现了和穿透一切以太的观念的偏差。人们预料光在通过以太时会以恒定的速率行进；但如果你通过以太顺着光的方向运动，光的速度会显得更慢，而如果你逆着光的方向运动，它的速度会显得更快（图1.1）。



阿尔伯特·爱因斯坦于1920年。



图1.1　固定以太理论

如果光是在一种称为以太的弹性物质中的波，则在向它运动来的航天飞船上的某人（a）看来光速变得较高，而在与光同方向运动的航天飞船上的某人（b）看来光速变得较低。

然而一系列实验不支持这个观念。其中阿尔伯特·迈克耳孙和爱德华·

莫雷于1887年在俄亥俄的克里夫兰的凯思应用科学学校进行的实验最为仔细，也最为精确。他们对相互垂直的两束光的速度进行比较。随着地球绕轴自转以及绕日公转，仪器以变化的速率和方向通过以太运动（图1.2）。但是迈克耳孙和莫雷在两光束之间没有找到周日或周年的变化。不管人们在哪个方向上多快地运动，光似乎总是以相同的速率相对于它的所在地运动（图1.3，见第8页）。

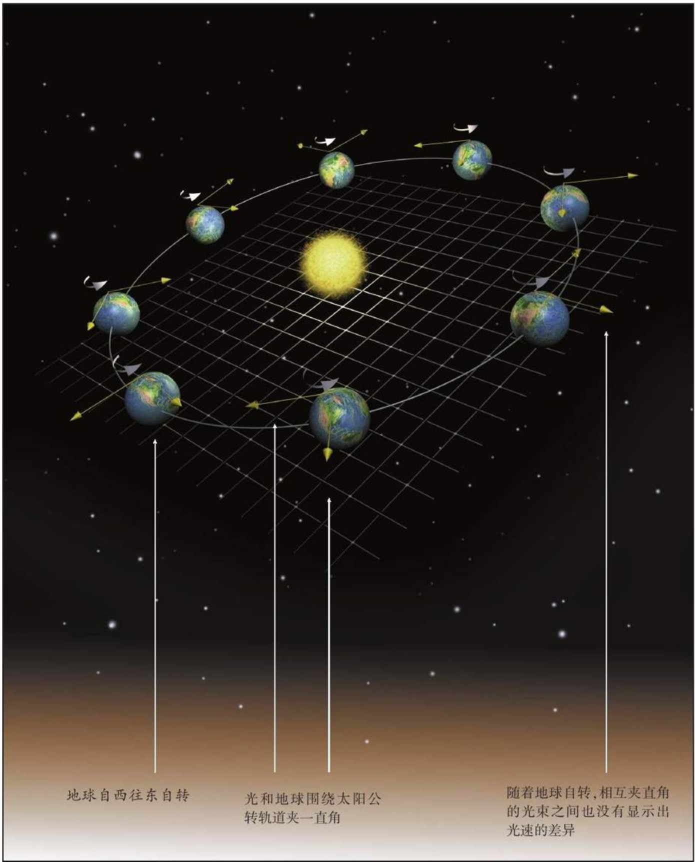


图1.2

在地球公转方向和与它相垂直的方向的光速之间找不到任何差别。

爱尔兰的物理学家乔治·费兹杰拉德和荷兰的物理学家亨得利克·洛伦兹，在迈克耳孙-莫雷实验的基础上提出，物体在通过以太运动时会收缩，而且钟表要变慢。这种收缩和钟表变慢，会使得人们不管如何相对于以太运动，总会测量到相同的光速（费兹杰拉德和洛伦兹仍然把以太看作实在的物质）。然而，爱因斯坦在1905年6月撰写的一篇论文中指出，如果人们不能检测出他是否穿越空间的运动，则以太观念纯属多

余。相反，他以科学定律对于所有自由运动的观察者都显得相同的假设为出发点。特别是，不管他们多快运动，都应测量到相同的光速。光速和他们的运动无关，并且在所有方向上都相同。

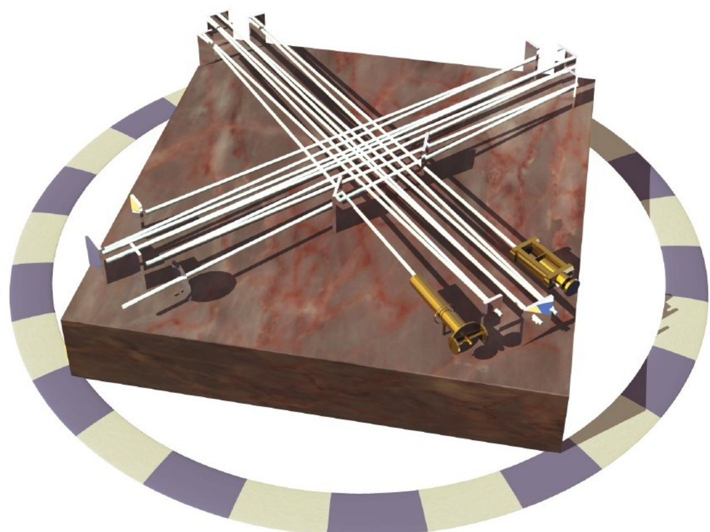
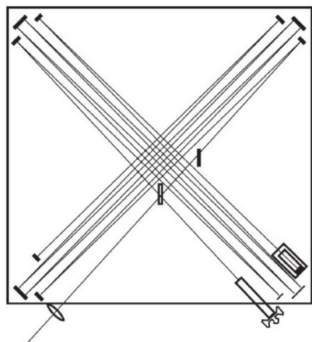


图1.3　测量光速

在迈克耳孙-莫雷干涉仪中，从一个光源发出的光被一面半镀银的镜子分成两束。这两束光在相互垂直的方向上行进，然后再让它们射到该半镀银镜面上而合并成一束。光速在这两个方向上的差异意味着一束光的波峰和另一束光的波谷可同时到达并且相互抵消。

刊登于1887年《科学美国人》的该实验的示意图。



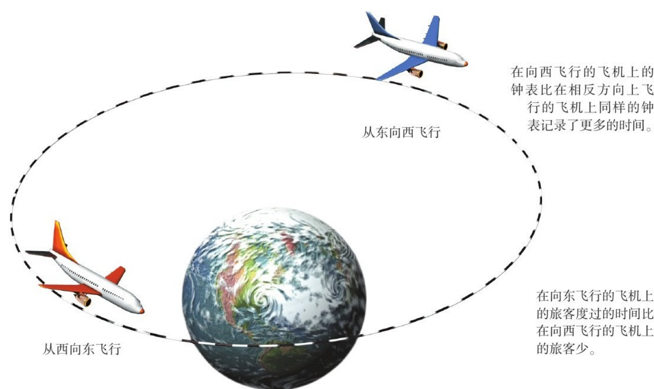


图1.4

围绕着地球在相反方向上飞行的两台精确的钟表的实验验证了孪生子佯谬的一种版本（参见第10页的图1.5）。当它们重新相遇时，向东飞行的钟表流逝的时间稍微短一些。

这就需要抛弃一个观念，即存在一个所有钟表都测量的称为时间的普适的量。相反地，每个人都有他或她自己个人的时间。如果两个人处于相对静止状态，则他们的时间就一致，但是他们相互运动时就不一致。

这已经被很多实验证实，其中包括两台以相反方向围绕世界飞行的精确的钟表回返后显示时间的非常微小的差异（图1.4）。这似乎暗示，人们若要活得更长久，应该不断地向东飞去，使得地球的旋转叠加上飞机的速度。然而，人们所获取的比一秒还短得多的生命延长，远远不及劣质飞机餐对健康的损害。

爱因斯坦的假定，即自然定律对于所有自由运动的观察者应该显得相同，是相对论的基础。之所以这么称呼是因为它意味着只有相对运动才是重要的。它的美丽和简单征服了许多思想家，但是仍然有许多人反对。爱因斯坦推翻了19世纪科学的两个绝对物：以太代表的绝对静止和所有钟表都测量的绝对或普适时间。许多人觉得这是一个令人不安的概念。他们问道，这是否意味着，万物都是相对的，甚至不存在绝对的道德标准呢？这种苦恼持续贯穿20世纪20年代和30年代。1921年爱因斯坦获得诺贝尔奖时，其颂辞是关于重要的，但是按照他的标准却是相对次要的，也是在1905年所做的研究。它没有提及相对论，因为相对论被认为太过于争议性了（我仍然每周收到两三封信，告诉我爱因斯坦是错误的）。尽管如此，现在科学界已经完全接受了相对论，无数的应用证

实了它的预言。



图1.5

孪生子佯谬

在相对论中每位观察者都具有自身的时间测度。这会导致所谓的孪生子佯谬。

孪生子中的一位（a）出发进行空间航行，其航行速度接近于光速（c），而他的兄弟（b）留在地球上。

因为他的运动，从地面上的孪生子看来，在航天飞船上的时间流逝得较慢。

这样在航天者返回时（a2）将会发现他的兄弟（b2）比他较衰老。

虽然这似乎和常识相抵触，一系列实验已经证明在这个场景中旅行的孪生子确实较年轻些。

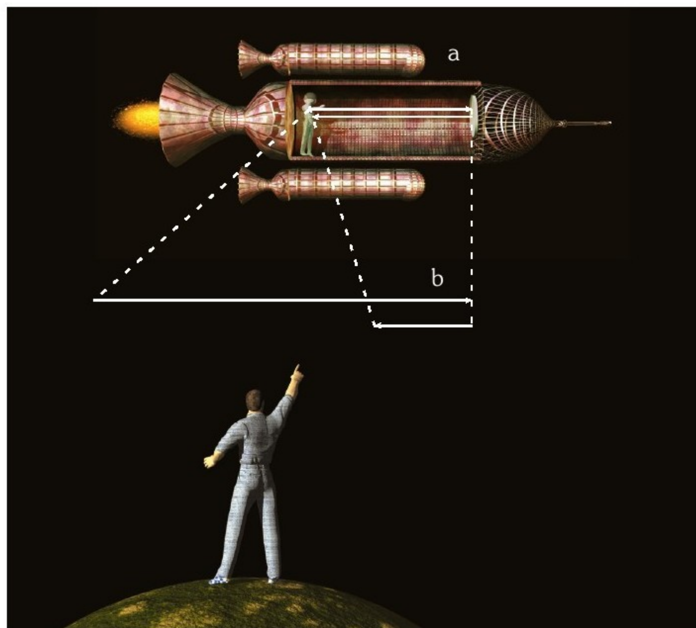


图1.6

一个航天飞船以五分之四的光速从左向右掠过地球。一束光脉冲从座舱的一端发射出来并在另一端被反射回来（a）。

在地球上的和在航天飞船上的人分别对光进行观察。因为航天飞船的运动，他们在光返回的旅行距离上意见不同（b）。

因为按照爱因斯坦关于对所有自由运动的观察者光速相同的假设，所以他们在光花费多少时间飞行上意见也应该不同。

相对论的一个非常重要的推论是质量和能量的关系。爱因斯坦关于光速对于任何人而言都显得相同的假设意味着，没有东西可以运动得比光还快。当人们用能量加速任何物体，无论是粒子或者航天飞船，实际上发生的是，它的质量增加，使得对它进一步加速更加困难。因为要把一个粒子加速到光速要消耗无限大能量，所以是不可能的。正如爱因斯坦的著名公式$E=mc^2$总结的（图1.7），质量和能量是等效的。这也许是物理学中唯一的妇孺皆知的公式。它的一项后果是意识到，如果铀原子核裂变成总质量稍小的两个核，就会释放出巨大的能量（图1.8，见14页）。



图1.7



1939年另一次世界大战已迫在眉睫，众多意识到这些含义的科学家说服爱因斯坦克服其和平主义原则，以他的权威给罗斯福总统写一封信，要求美国开始核研究计划。

这就导致了曼哈顿计划并最终制造出于1945年在日本的广岛和长崎爆炸的原子弹。有人将原子弹归咎于爱因斯坦发现了质能关系；但是这和把飞机失事归咎于牛顿发现了引力很类似。爱因斯坦本人没有参与曼哈顿计划，并且为投掷原子弹而感到震惊。





爱因斯坦在1939年致罗斯福总统的富有预见的信函。

“在最近的4个月里，通过在法国的约里奥以及在美国的费米和西拉德的研究，似乎在大量铀元素中可能建立核子连锁反应，由此可以产生巨大的功率以及大量的新的类镭元素。现在几乎可以肯定，在最近的将来就能立即实现这一切。

这种新现象也会导致制造一种新型炸弹，那是一种极其强大的炸弹，这是可以想见的，虽然比前面所说的不确定得多。”

爱因斯坦1905年的开创性论文为他建立了科学声望。但是直到1909年他才得到苏黎世大学的位置，这使他得以离开瑞士专利局。两年之后，他转到布拉格的日耳曼大学。但是，1912年他回到苏黎世，这一次是返回苏黎世高工。尽管在欧洲的许多地方，甚至在大学中盛行反犹主义，他现在已是学术界巨星。维也纳和乌得勒支都邀请他任教，但是他选择了柏林的普鲁士科学院的研究员职务，因为这样他可以摆脱教学。1914年4月他迁往柏林，不久他的妻子和两个儿子也来团聚。然而婚姻不谐已有时日，他的家庭不久返回苏黎世。尽管他偶尔去看望他们，他和妻子最终还是离婚了。爱因斯坦后来娶了他住在柏林的表姐爱尔莎。在战争年代里他过着独身生活，避免了家事纠缠，这也许是他在这一段时期科学上多产的一个原因。



图1.8

核结合能

核是由被强力捆在一起的质子和中子构成。但是核的质量总是比组成

它的质子和中子的各自质量之和小。这个差就是把核结合在一起的结合能的度量。可从爱因斯坦关系算出这一结合能：核结合能＝驻mc2，此处驻m是核质量和各个质量和的差。

正是这一势能的释放产生了核武器的毁灭性的爆炸力。

虽然相对论和制约电磁学的定律配合得天衣无缝，它却不能和牛顿的引力定律相协调。牛顿引力定律说，如果人们在空间的一个区域改变物质分布，在宇宙其他任何地方的引力场改变就会瞬刻觉察到。这不仅意味着人们可以发送比光还快的信号（这是相对论禁止的事物）；为了知道瞬刻在这里的含义，它还需要存在绝对或普适时间。这正是那种被相对论抛弃了的，并用个人时间取代的时间。

1907年当爱因斯坦还在伯尔尼专利局工作时，他就知道了这个困难，但是直到1911年他在布拉格时才开始认真地思考这个问题。他意识到在加速度和引力场之间存在一个密切的关系。待在一个封闭盒子，譬如升降机中的某人不能将盒子静止地处于地球引力场中和盒子在自由空间中被火箭加速这两种情形区别开来（当然，爱因斯坦处于《星际航行》时代之前，只能想到升降机中而不是航天飞船中的人）。但是人们在升降机中加速或者自由下落不远就会发生灾难（图1.9）。

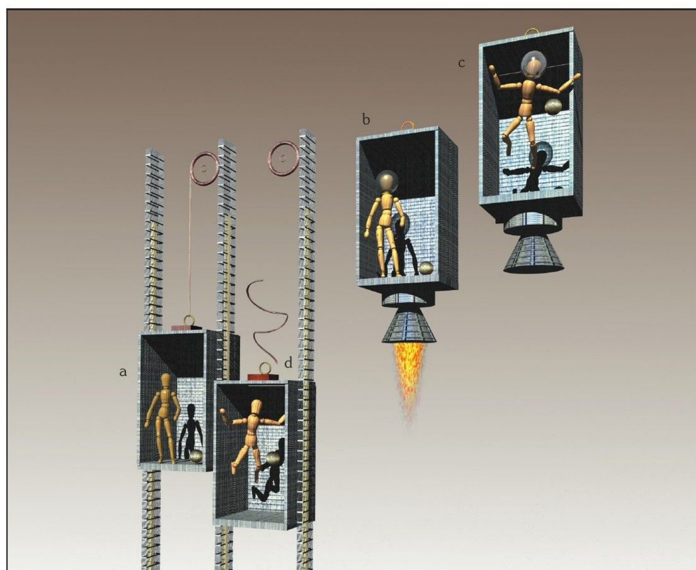


图1.9

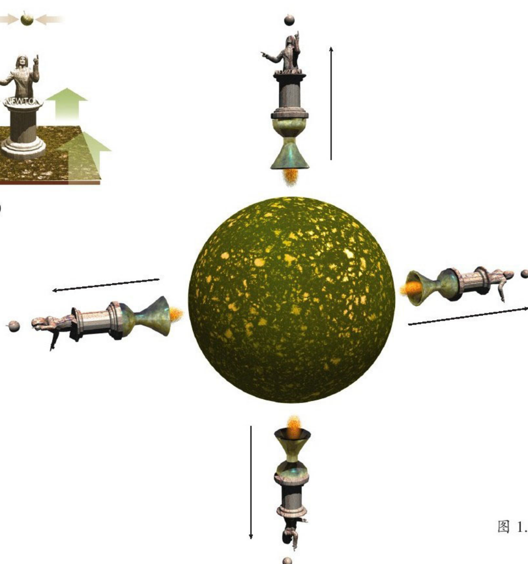
在一个盒子中的观察者无法区分两种情形：（a）处于地球上的固定的升降机中和（b）在自由空间中被火箭加速。

如果火箭发动机关闭（c），其感觉就和升降机向通道底部自由下落一样（d）。

如果地球是平坦的，人们既可以说苹果因为引力而落到牛顿头上，也可以等效地说因为牛顿和地面被往上加速（图1.10）。然而，对于球形地球加速度和引力之间的等效似乎不成立，世界相反两边的人们必须在相反的方向上被加速，却又停留在固定的相互距离上（图1.11）。

但是，在爱因斯坦1912年回苏黎世时，他灵感奔涌，意识到如果时空几何是弯曲的，而不像迄今所假定的那样是平坦的，则等效成立。他的思想是质量和能量以一种还未被确定的方式弯曲时空。诸如苹果或者行星的物体在通过时空时企图沿着直线运行，但是因为时空是弯曲的，所以它们的轨道显得被引力场弯折了（图1.12）。





如果地球是平坦的（图1.10），人们既可以说因为重力苹果落到牛顿头上，也可以说地球和牛顿被向上加速。因为对于球形地球（图1.11），在世界相反两边的人们会相互越离越远，所以这种等效不成立。爱因斯坦使空间和时间变得弯曲，从而克服了这个困难。

爱因斯坦借助于他的朋友玛索尔·格罗斯曼通晓了弯曲空间和面的理论。在此之前乔治·弗雷德里希·黎曼把这种理论发展成一种抽象数学；黎曼从未想到它和实在世界有何相干。1913年爱因斯坦和格罗斯曼合写了一篇论文，他们在论文中提出了这样的思想，我们认为是引力的只不过是时空为弯曲的这一事实的表现。然而，由于爱因斯坦的一个错误（他

相当人性并易犯错误），他们未能找到将时空曲率和处于其中的质量和能量相联系的方程。爱因斯坦在柏林继续研究这个问题。他不受家事的烦扰，而且基本上不受战争影响，终于在1915年11月找到了正确的方程。1915年夏天，当他访问格丁根大学时曾经和数学家大卫·希尔伯特讨论过他的思想，希尔伯特甚至比爱因斯坦还早几天独立地找到了同一方程。尽管如此，正如希尔伯特本人承认的，新理论的功劳应归于爱因斯坦：把引力和时空弯曲联系起来正是爱因斯坦的思想。这个时期的德国作为文明国家是值得赞扬的，甚至在战时科学讨论和交流仍然可以不受干扰地进行。这和20年后的纳粹时期相比真是天壤之别。

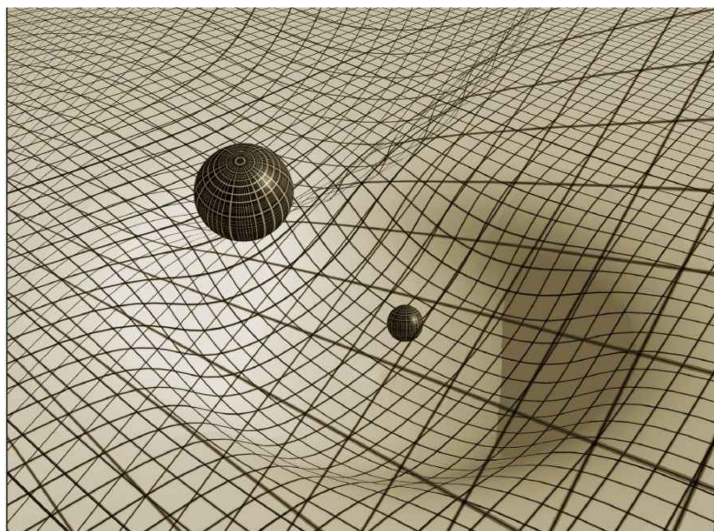


图1.12　时空弯曲

只有当一个大质量的物体将时空弯曲并由此将在它邻近的物体的路径弯折，加速度和引力才变成等效的。

Professor Einstein

Albert Einstein™

Low

弯曲时空的新理论称为广义相对论，以和原先没有引力的理论相区别，后者现在称为狭义相对论。1919年当英国赴西非的探险队在日食时观察到光线通过太阳邻近被稍微偏折（图1.13），广义相对论因而得到了辉煌的确认。这正是空间和时间被弯曲的直接证据。它激励了从欧几里得在公元前300年左右写下《几何原本》以来，我们对自身生活其间的宇宙之认识的最大变革。

爱因斯坦的广义相对论把空间和时间从一个事件在其中发生的被动的背景转变成宇宙动力学的主动参与者。这就引发了一个伟大的问题，这个问题在21世纪仍然处于物理学的最前沿。宇宙充满物质，而物质弯曲时空的方式使物体落到一块。爱因斯坦发现他的方程没有描述一个静态，也就是在时间中不变的宇宙的解。他宁愿不放弃这样一种永恒的宇宙，这正是他和其他大多数人所深信的，而不惜对该方程进行补缀，添加上称为宇宙常数的一项。宇宙常数在相反的意义上将时空弯曲，使得物体相互离开。宇宙常数的排斥效应可以平衡物质的吸引效应，这样就容许宇宙具有静态解。这是理论物理学的历史中错失的最重大的机会之一。如果爱因斯坦坚持其原先的方程，他就能够预言宇宙要么正在膨胀，要么正在收缩，两者必居其一。事实上，直至20世纪20年代在威尔逊山上用100英寸（1英寸＝2.54厘米）望远镜进行观测，人们才认真接

受随时间变化的宇宙的可能性。

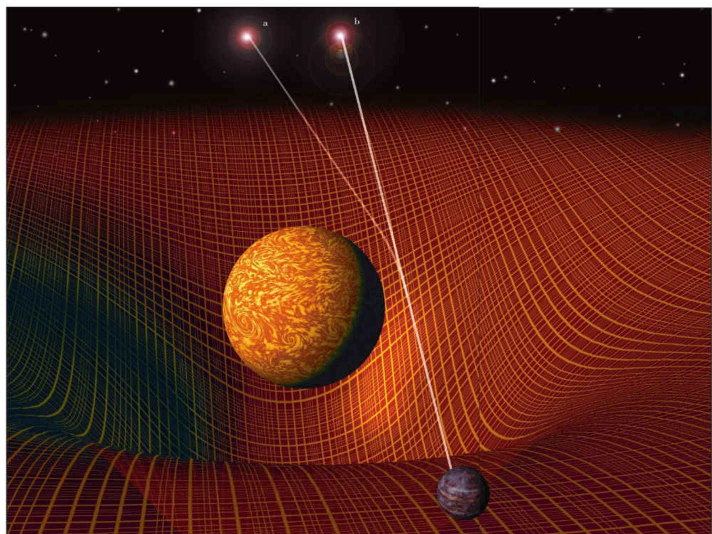


图1.13　光线弯曲

从一个恒星发出的通过太阳邻近的光线因太阳质量弯曲时空而受到偏折（a）。这使得从地球上看，该恒星的表观位置发生轻微的移动（b）。日食时可以观察到这个效应。

这些观测揭示了，星系和我们相距越远，则越快速地离我们而去。宇宙正在膨胀，任何两个星系之间的距离随时间恒定地增加（图1.14，见22页）。这个发现排除了为获得静态宇宙解对宇宙常数的需要。爱因斯坦后来把宇宙常数称为他一生中最大的错误。然而，现在看来这也许根本不是什么错误：将在第三章中描述的现代观测暗示，也许确实存在一个小的宇宙常数。

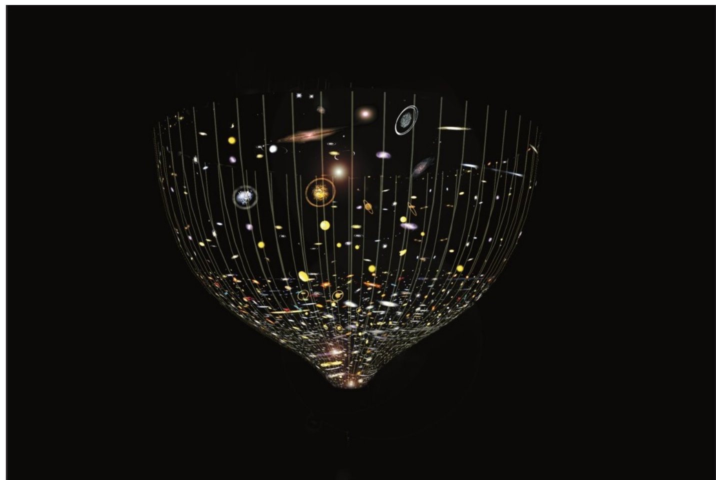
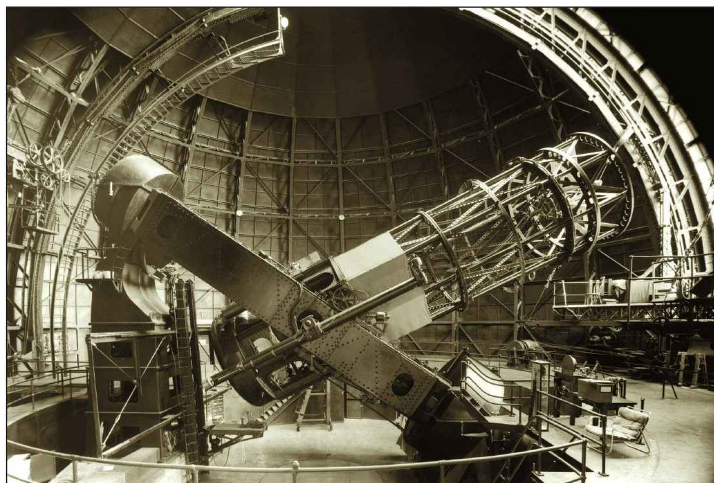


图1.14

对星系进行观测表明宇宙正在膨胀：几乎任何一对星系之间的距离都在增大。

广义相对论彻底地改变了有关宇宙起源和命运的讨论。一个静态的宇宙可以存在无限长时间，或者以它目前的形状在过去的某个瞬间创生。然而，如果现在星系正在相互分开，这表明它们过去曾经更加靠近。大约150亿年以前，所有它们都会相互落在一起，而且密度非常巨大。天主教牧师乔治·拉玛特是第一个研究我们今天叫做大爆炸的宇宙起源的人。他把这种状态称作“太初原子”。

爱因斯坦似乎从未认真地接受过大爆炸。他显然认为，如果人们随着星系的运动在时间上回溯过去，则一个一致膨胀宇宙的简单模型就会失效，因为星系的很小的斜向速度将会使它们相互错开。他认为，宇宙也许早先有过一个收缩相，在一个相当适度的密度下反弹成现在的膨胀。然而，我们现在知道，为了在早期宇宙中核反应能产生在我们周围观察到的轻元素的数量，其密度曾经一度至少达到每立方英寸10吨；而且温度至少达到100亿度。此外，微波背景的观测显示，密度也许一度达到每立方英寸1亿亿亿亿亿亿亿亿亿（1后面跟72个零）吨。我们现在还知道，爱因斯坦的广义相对论不允许宇宙从一个收缩相反弹到现在的膨胀。正如在第二章中将要讨论的，罗杰·彭罗斯和我能够证明，广义相对论预言宇宙从大爆炸起始。这样爱因斯坦理论的确隐含着时间有一开端，虽然他从不喜欢这个思想。



威尔逊山天文台100英寸（1英寸＝2.54厘米）胡科望远镜。

爱因斯坦甚至更不愿意承认广义相对论的预言，即当一个大质量恒量到达其生命的终点，而且不能产生足够的热去平衡其自身使它收缩的引力时，时间将会到达尽头。爱因斯坦认为，这样的恒星将会在某一终态安定下来。但是我们现在知道，对于比太阳质量两倍还大的恒星并不存在终态的构型。这类恒星将会继续收缩直至它们变成黑洞。黑洞是时空中如此弯曲的一个区域，甚至连光线都无法从那里逃逸出来（图1.15）。

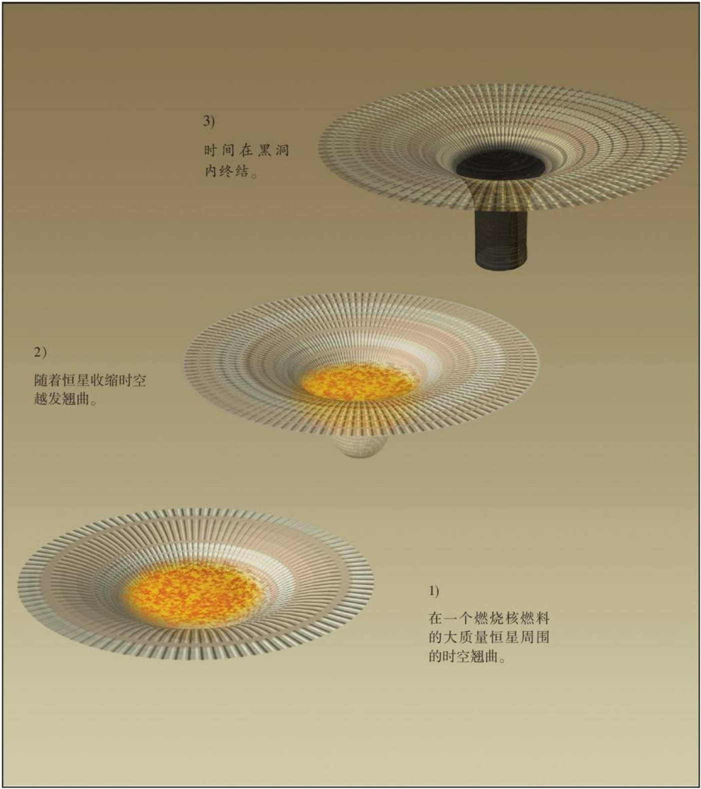


图1.15

当一个大质量的恒星消耗完它的核燃料时，它将丧失热量并且收缩。时空将被弯翘得这么厉害以至于产生黑洞。光不能从黑洞逃逸。时间将在黑洞之内终结。

彭罗斯和我证明了，广义相对论预言，无论是该恒星，还是任何不慎落入黑洞的可怜的航天员，其时间在黑洞中都将到达终点。但是无论是时间的开端还是终结，都是广义相对论方程不能被定义之处。这样理论不能预言从大爆炸会出现什么。有些人将此视作上帝具有随心所欲创生宇宙的自由的显示，但是其他人（包括我自己）觉得宇宙的开端应受

在其他时刻成立的同样定律的制约。正如在第三章中将要描述的那样，我们为达到这一目标已经取得一些进展。但是我们尚未完全理解宇宙的起源。

广义相对论在大爆炸处失效的原因是它和量子理论不相协调。量子理论是20世纪早期的另一项伟大的观念变革。1900年马克斯·普朗克在柏林发现，如果光只能以分立的称为量子的波包发射或者吸收，就可以解释来自一个炽热物体的辐射。这是向量子理论进展的第一步。1905年爱因斯坦在专利局撰写的开创性论文中的一篇里指出，普朗克的量子假设可以解释所谓的光电效应。光电效应是讲当光照射到某些金属表面时释放电子的方式。这是现代光检测器和电视摄像机的基础，也正是因为这个工作，爱因斯坦获得了诺贝尔物理学奖。



阿尔伯特·爱因斯坦和他本人的木偶合影，该照片摄于他到美国定居后不久。

直至20世纪20年代爱因斯坦继续研究量子的思想，但是哥本哈根的威纳·海森伯，剑桥的保罗·狄拉克和苏黎世的厄文·薛定谔的工作使他深为困扰。这些人发展了所谓量子力学的实在的新图象。微小的粒子不再具有确定的位置和速度。相反，粒子的位置被测量得越准确，其速度则被测量得越不准确，反之亦然。基本定律中的这一随机的不可预见的要素使爱因斯坦震惊，他从未全盘接受过量子力学。他的著名格言表达了他的情感："上帝不掷骰子。"然而，新的量子定律能够解释一大批原先未能阐明的现象并和观测极好地符合，所以其他大多数科学家都欣然接受，认为它们是成立的。它们是现代化学、分子生物学和电子学发展的基础，也是近50年来使世界发生翻天覆地变化的技术基础。

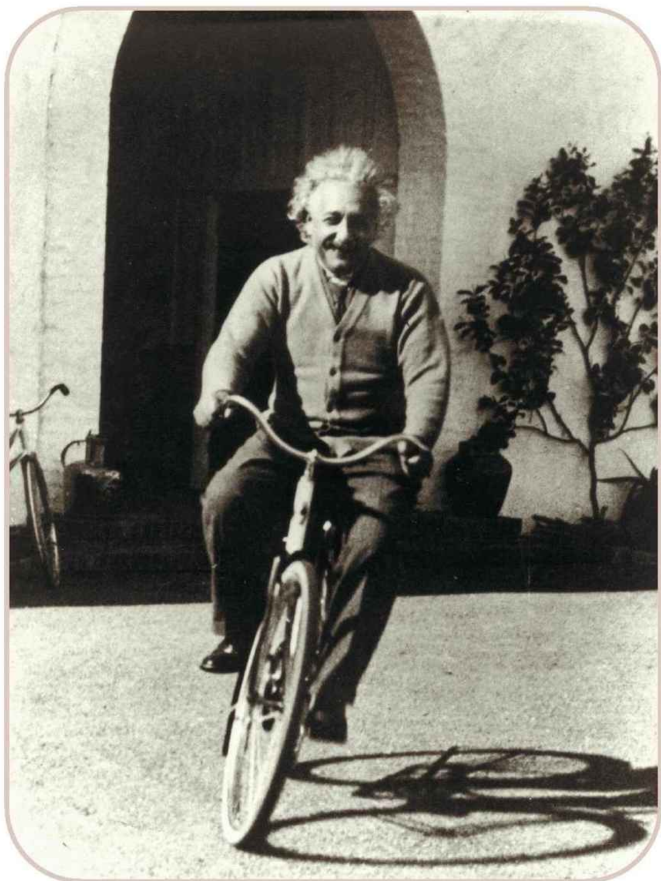
1932年12月获悉纳粹和希特勒即将在德国上台，爱因斯坦离开德国并在4个月后放弃德国国籍。他的最后20年是在新泽西普林斯顿的高等

学术研究所度过的。



纳粹在德国发动了反对“犹太人科学”运动，而许多德国科学家是犹太人；这是德国不能制造原子弹的部分原因。爱因斯坦和相对论成为这个运动的主要目标。当他听说出版题为《100个反爱因斯坦的作家》的图书时，回答道：“何必要100个人呢？如果我是错的，一个人就足够了。”第二次世界大战之后，他要求盟国政府建立一个世界政府以控制原子弹。1948年他拒绝了担任以色列新国家总统的邀请。他曾经说过：“政治是为当前，而方程却是一种永恒的东西。”广义相对论的爱因斯坦方程是他最好的墓志铭和纪念物。它们将和宇宙同在。

世界在上一世纪的改变超过了以往的任一世纪。其原因并非新的政治或经济的教义，而是由于基础科学的进步导致了技术的巨大发展。还有何人比阿尔伯特·爱因斯坦更能代表这些进步呢？



Albert Einstein™

第二章
时间的形状

爱因斯坦的广义相对论赋予时间以形状。这如何与量子理论相互和谐。



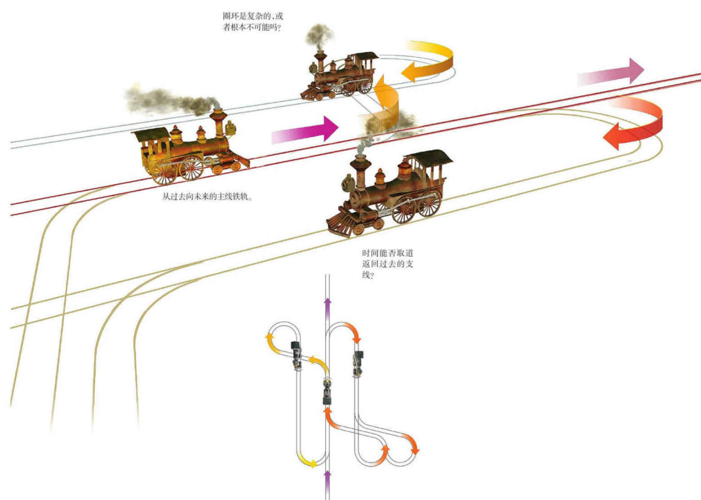


图2.1　时间的铁轨模型

它是一根向未来方向延伸的主线，还是可能返回过去并在更早先的时刻连接到主线上去？

时间为何物？它是否像古老赞歌说的那样，把我们所有的梦想一卷而空的东流逝波？抑或像一道铁轨？它或许有环状侧线和分岔，这样你可以一直前进，却又回到线上的早先过站（图2.1）。

19世纪作家查里斯·兰姆写道：“世间万物没有任何东西像时间和空间那么使我困惑。然而，因为我从来不去思考时间和空间，所以它们带给我的烦恼比任何其他东西都少。”我们中的大多数人在大部分时间不去忧虑时间和空间，不管它们为何物；但是我们所有人有时极想知道时间是什么，它如何开始，并且把我们导向何方。

关于时间或者任何别的概念的任何可靠的科学理论，依照我的意见，都必须基于最可操作的科学哲学之上：这就是卡尔·波普和其他人提出的实证主义的方法。按照这种思维方式，科学理论是一种数学模型，它能描述和整理我们所进行的观测。一种好的理论可在一些简单假设的基础上描述大范围内的现象，并且做出能被检验的确定的预言。如果预言和观测相一致，则该理论在这个检验下存活，尽管它永远不可能被证明是正确的。另一方面，如果观测和预言相抵触，人们必须将该理论抛弃或者修正。（人们认为这终究是要发生的。但是人们在实际中经常诘问观测的精确性和可靠性以及那些观测者的道德品质。）如果人们如同我那样，采用实证主义立场，他就不能说时间究竟为何物。人们所能做的一切，是将所发现的东西描述成一种非常好的关于时间的数学模型从而说明它能预言什么。

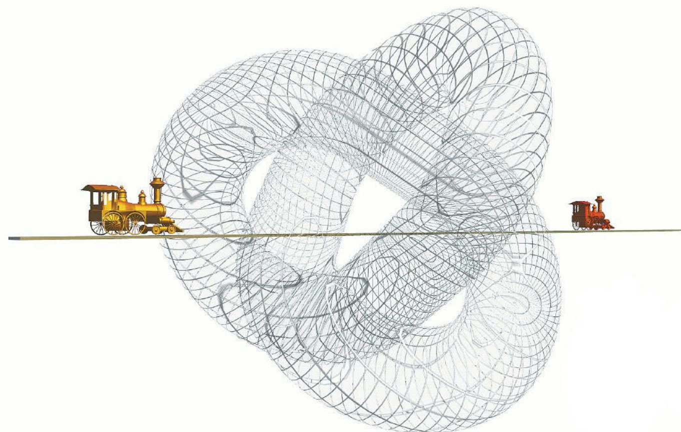
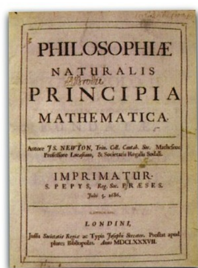


图2.2
牛顿的时间和空间互相分离，它仿佛是一根在两个方向上都无限延伸的铁轨。



PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore JS. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos
Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

艾萨克·牛顿在*300*多年以前发表了他的时间和空间的数学模型。

艾萨克·牛顿在他1687年出版的《数学原理》一书中为我们给出时间和空间的第一个数学模型。牛顿担任剑桥的卢卡斯教席。我现在担任的正是同一教席。虽然在牛顿那个时代这一教席不用电力驱动。时间和空间在牛顿的模型中是事件发生的背景，但是这种背景不受事件的影响。时间和空间相互分离。时间被认为是一根单独的线，或者是两端无限延伸的铁轨（图2.2）。时间本身被认为是永恒的，这是在它已经存在并将存在无限久的意义上来说的。与此相反，大多数人认为有形宇宙是在区区几千年前以多少和现状相同的形态创生的。这引起哲学家们的忧虑，譬如德国思想家伊曼努尔·康德。如果宇宙的的确确是被创生的，那么为何要在创生之前等待无限久？另一方面，如果宇宙已经存在了无限久，为何将要发生的每一件事不早已发生，使得历史早已完结？特别是，为何宇宙尚未到达热平衡，使得万物都具有相同温度？



图2.3



时间的形态和方向

爱因斯坦的相对论和大量的实验相互符合，它指出时间和空间是非常复杂地相互纠缠在一起。人们不能仅仅弯曲空间而不涉及时间。这样，时间就有了形状。然而，它只能往一个方向前进，正如图中的火车头那样。

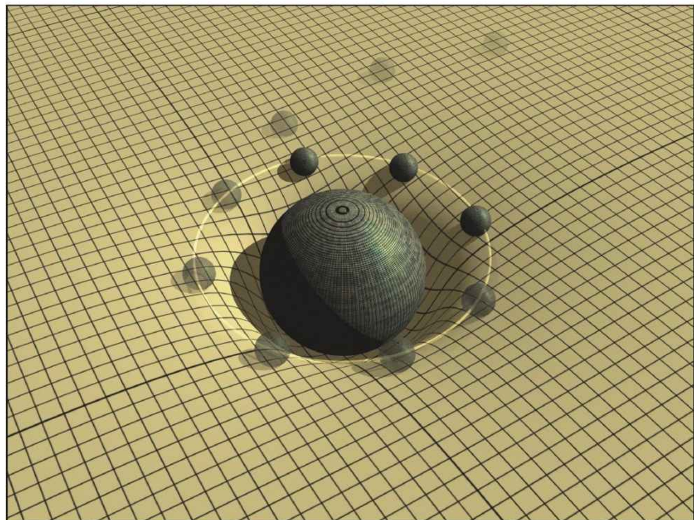


图2.4

橡皮膜比喻

中心的大球代表一个大质量物体，譬如一个恒星。它的质量使它邻近的膜弯曲。其曲率使在膜上滚动的滚珠轨迹偏折，并且围绕着大球运动，就和在一个恒星的引力场中的行星能围绕着它公转一样。

康德把这个问题称作“纯粹理性的二律背反”，因为它似乎是一个逻辑矛盾；它没有办法解决。但是只有在牛顿数学模型的框架里它才是矛盾。时间在牛顿模型中是一根无限的线，它独立于在宇宙中发生的东西。然而，正如我们在第一章中看到的，爱因斯坦在1915年提出了一种崭新的数学模型：广义相对论。在爱因斯坦发表该论文以后的年代里，我们又添加了一些细节，但是爱因斯坦提出的理论仍然是我们时间和空间模型的基础。本章和下几章将描述，从爱因斯坦革命性论文之后的年代里我们的观念是如何发展的。这是许许多多人合作成功的故事，而且我为自己的小贡献感到自豪。

广义相对论把时间维和空间的三维合并形成所谓的时空（见33页，图2.3）。该理论将引力效应表达为，宇宙中物质和能量的分布引起时空弯曲和畸变，使之不再平坦。这个时空中的物体企图沿着直线运动，但是因为时空是弯曲的，它们的轨迹显得被弯折了。它们的运动犹如受到引力场的影响。





圣·奥古斯丁，这位5世纪的思想家认为在世界开端之前时间不存在。

取自《上帝之城》，12世纪，劳伦佐图书馆，佛罗伦萨。

作为一个粗糙的比喻，但不要过于拘泥，想象一张橡皮膜。人们可把一个大球放在膜上，它代表太阳。球的质量把膜压陷下去，使之在太阳邻近弯曲。现在如果人们在膜上滚动小滚珠，它不会直接地滚到对面去，而是围绕着该重物运动，正如行星绕日公转一样（图2.4）。

这个比喻是不完整的，因为在这个比喻中只有空间的两维截面（橡皮膜的表面）是弯曲的，而时间正如在牛顿理论中那样，没有受到扰动。然而，在与大量实验相符合的相对论中，时间和空间难分难解地相互纠缠。人们不能只使空间弯曲，而让时间安然无恙。这样就赋予时间以形状。广义相对论使空间和时间弯曲，把它们从被动的事件发生的背景改变成为发生事件的主动的动力参与者。在牛顿理论中，时间独立于其他万物而存在，人们也许会诘问：上帝在创造宇宙之前做什么？正如圣·奥古斯丁说的，人们不可以此为笑柄，就像有人这样说过：“它正为

那些寻根究底的人们准备地狱。”这是一个人们世代深思的严肃的问题。根据圣·奥古斯丁的说法，在上帝制造天地之前，它根本无所作为。事实上，这和现代观念非常接近。

另一方面，在广义相对论中时间和空间的存在不仅不能独立于宇宙，而且不能相互独立。它们由宇宙中的测量定义，譬如钟表中的石英晶体的振动数或者尺子的长度。以这种方式在宇宙中定义的时间应该有一个最小或者最大值，换句话说，也就是开端或者终结，这是完全可以理解的。询问在开端之前或者终结之后发生什么是没有任何意义的，因为这种时间是不被定义的。

判定广义相对论的数学模型是否预言宇宙以及时间本身应有一个开端或者终结，显然是非常重要的。在包括爱因斯坦在内的理论物理学家中普遍有一种成见，认为时间在两个方向都必须是无限的。否则的话就引起有关宇宙创生的令人不安的问题，这个问题似乎在科学王国之外。人们知道时间具有开端或者终结的爱因斯坦方程的解，但是所有这些解都是非常特殊的，具有大量的对称性。人们以为，实际物体在自身引力下坍缩时，其压力或者斜方向的速度会阻止所有物质一道落向同一点，使那一点的密度变成无限大。类似地，如果人们在时间的相反方向将宇宙膨胀倒溯回去，他会发现宇宙中的全部物质并非都从具有无限密度的一点涌现。这样无限密度的点称为奇点，并且是时间的开端或终结。

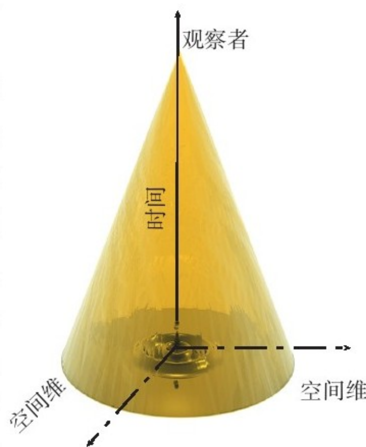
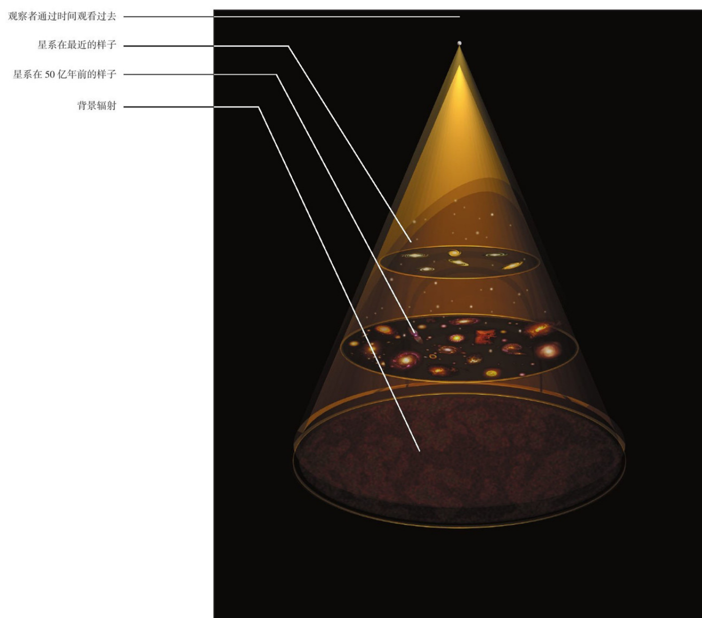


图2.5　我们的过去光锥

当我们观看遥远的星系，因为光以有限的速度传播，所以我们是在看早先时刻的宇宙。如果我们用垂直方向来代表时间，用水平方向来代

表三个空间方向中的两个，那么在此刻到达处于顶点的我们的光线是沿一个圆锥面朝我们行进而来的。

1963年两位苏联科学家叶弗根尼·利弗席兹和艾萨克·哈拉尼科夫宣称他们证明了，所有具有奇点的爱因斯坦方程的解都对物质和速度做过特殊的排列。代表宇宙具有这种特殊排列的解的机会实际上为零。几乎所有能代表宇宙的解都避免无限密度的奇点：在宇宙膨胀时期之前一定有过一个预先的收缩相。在收缩相中物质落到一起，但是相互之间不碰撞，在现在的膨胀相中重新分离。如果事实果真如此，则时间就会从无限过去向无限将来永远流逝。



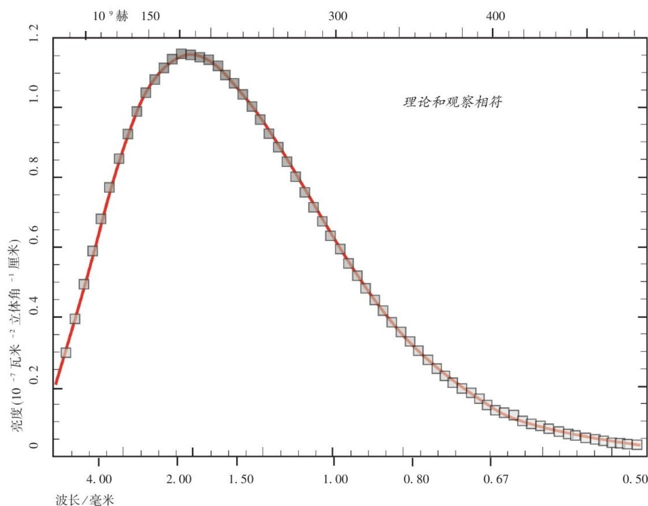


图2.6

微波背景谱的测量

宇宙微波背景辐射谱——强度随频率的分布——是典型的热体辐射谱。为了使辐射处于热平衡，物体一定将它散射了多次。这表明在我们的过去光锥上一定有足够的物质使它向内弯折。

利弗席兹和哈拉尼科夫的论证并没有使所有人信服。相反，罗杰·彭罗斯和我采用了不同的手段，不像他们那样基于解的细节研究，而是基于时空的全局结构。在广义相对论中，不仅在时空中的大质量物体，而且在其中的能量将时空弯曲。能量总是正的，所以它赋予时空这样的曲率，使光线的轨道向相互方向弯折。

现在考虑我们的过去光锥（图2.5），也就是从遥远的星系来的，在此刻到达我们的光线通过时空的途径。在一张时间向上方画空间往四边画的图上，它是一个圆锥，其顶点正是我们的此时此地。随着我们在光锥中从顶点向下走向过去，我们就看到越来越早的星系。因为迄今为止宇宙都在膨胀，而且所有的东西在以前更加靠近得多。当我们更进一步往回看，我们便透过物质密度更高的区域。我们观测到微波辐射的黯淡背景，这种辐射是从宇宙在比现在密集得多也热得多的极早的时刻，沿着我们的过去光锥传播到我们的。我们把接收器调谐到微波的不同频率，就能测量到这个辐射的谱（功率随频率的分布）。我们发现了一个温度比绝对零度高2.7度的物体发出的特征辐射谱。

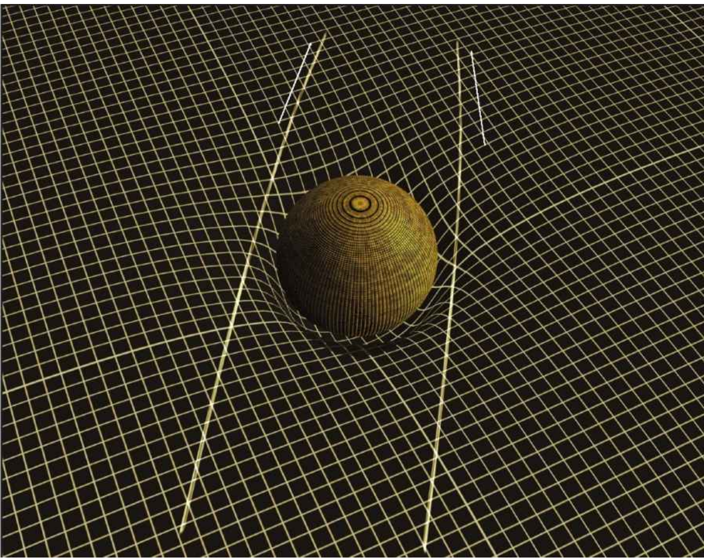


图2.7　翘曲的时空

因为引力是吸引的，物质总是翘曲时空，使得光线向相互方向弯折。

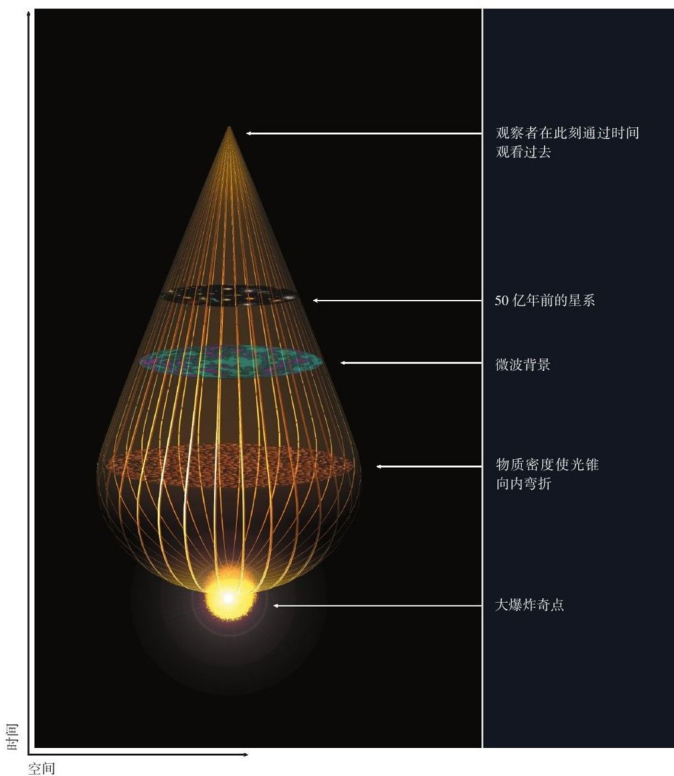


图2.8　时间是梨形的

如果人们沿着我们过去光锥回到以前，在早期宇宙中物质把光锥弯折回去。

我们观察的整个宇宙被包含在一个区域中，其边界在大爆炸缩小至零。这会是一个奇点，它是物质密度变成无限大而且经典广义相对论崩溃的地方。

这种微波辐射不能溶化冻比萨饼，但是该谱和2.7度的物体辐射谱那么一致这一事实告诉我们，这种辐射必须起源于对微波不透明的区域（见38页，图2.6）。

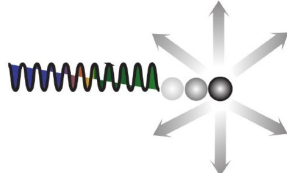
这样，我们能够得出结论，当我们沿着过去光锥回溯过去，它必须通过一定量的物质。这么多的物质足以弯曲时空，使得我们过去光锥中的光线往相互方向弯折（图2.7）。

当我们往过去回溯，过去光锥的截面会达到最大尺度，然后开始再度缩小。我们的过去是梨子形状的（图2.8）。

当人们沿着我们过去光锥回溯得更远，物质的正的能量密度使光线朝相互方面更强烈地弯折。光锥的截面在有限的时间内缩小到零尺度。这意味着，在我们过去光锥之内的所有物质被捕获在一个边界收缩为零的区域之内。因此，彭罗斯和我能够在广义相对论的数学模型中证明，时间必须具有称为大爆炸的开端就不足为奇了。类似的论证显示，当恒星和星系在它们自身的引力下坍缩形成黑洞，时间会有一个终结。我们抛弃了康德的暗含的假设，即时间具有独立于宇宙的意义的假设，因此逃避了他的纯粹理性的二律背反。我们证明时间具有开端的论文在1968年赢得引力研究基金会的第二名论文奖，罗杰和我对分了这丰厚的300美元。我认为同一年获奖的其他论文没有什么久远的价值。

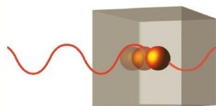
不确定性原理



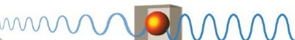


低频波干扰粒子的速度甚小。

高频波干扰粒子的速度甚大。







用来观察粒子的波长越长，其位置的不确定性越大。

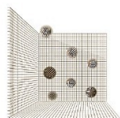
用来观察粒子的波长越短，其位置的确定性越大。

1900年马克斯·普朗克提出，光总是以他叫做量子的小波包传递的，这是发现量子论的重要步骤。虽然普朗克的量子假设清晰地解释了热体辐射率的观察，但是直到20世纪20年代中期当德国物理学家威纳·海森伯提出了著名的不确定性原理之后，其全部含义才被人们意识到。

他注意到，普朗克假设意味着，人们越想精确地测量一个粒子的位置，则他只能越不精确地测量其速度，反之亦然。

更精确地讲，他证明了粒子位置的不确定性乘以它的动量的不确定性总比普朗克常量大，这个常量是和一个光量子的能量含量密切相关的一个量。

海森伯不确定性方程



粒子的位置的不确定性

×



粒子的速度的不确定性

×



粒子质量

= 不小于普朗克常量

我们的研究引起了各式各样的反应。它使很多物理学家烦恼，但是使信仰创世纪的宗教领袖们欣喜：此处便是创世的科学证明。此时，利弗席兹和哈拉尼科夫就处于尴尬的境地。他们无法和我们证明的数学定理争辩，但是在苏维埃制度下，他们又不能承认自己错了，而西方科学是对的。然而，他们找到一族具有奇点的更一般的解，不像他们原先的解那么特殊，以此挽回颓势。这样他们便可以宣称，奇性以及时间的开端或终结是苏维埃的发现。

麦克斯韦场

1865年英国物理学家詹姆士·克拉克·麦克斯韦把电学和磁学的所有已知定律合并在一起。麦克斯韦理论以从一处到另一处传递作用的“场”的存在为基础。他意识到传递电磁扰动的场是动力学的实体：它们能够振荡并且穿越空间运动。

电磁学的麦克斯韦综合可以浓缩成制约这些场的动力学的两个方程。他自己从这些方程推导出第一个伟大的结论：所有频率的电磁波都以同样固定的速率——光速在空间旅行。

大多数物理学家仍然本能地讨厌时间具有开端或终结的观念。因此他们指出，可以预料数学模型不能很好地描述奇点附近的时空。其原因是，描述引力的广义相对论是一种经典理论，正如在第一章中提到的，它和制约我们已知的所有其他的力的量子理论的不确定性不相协调。因为在宇宙的大多数地方和大多数时间里，时空弯曲的尺度非常大，量子效应变得显著的尺度非常小，这种不一致性没有什么关系。但是在一个奇点附近这两种尺度可以相互比较，而量子引力效应就会很重要。这样，彭罗斯和我自己的奇性定理真正确立的是，我们时空的经典区域在过去或许还在将来以量子引力效应显著的区域为边界。为了理解宇宙的起源和命运，我们需要量子引力论，这将是本书大部分的主题。

具有有限数量粒子系统，譬如原子的量子理论，是20世纪20年代由海森伯、薛定谔和狄拉克提出的。（狄拉克是我在剑桥教席的另一位前任，但是那个教席还不是机动的。）然而，当人们试图把量子观念推广到麦克斯韦场时遭遇到了困难。麦克斯韦场描述电、磁和光。

人们可以把麦克斯韦场认为是由不同波长的波组成的（波长是在两个邻近波峰之间的距离）。在一个波中，场就像单摆一样从一个值向另一个值来回摆动（图2.9）。

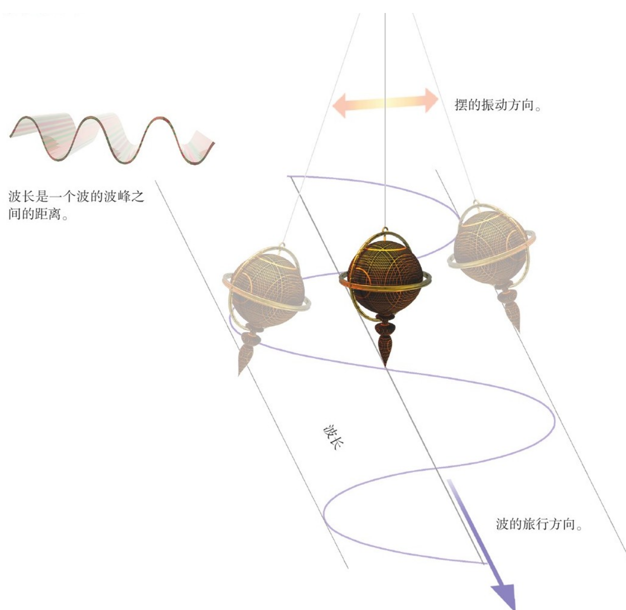


图2.9 前进的波和振动的摆

电磁辐射以波的方式通过空间传播，其电场和磁场在波运动方向的横向像摆那样振动。其辐射可由不同波长的场构成。

根据量子理论，一个单摆的基态或者最低能量的态不是只停留在最低能量的点上，而直接向下指。如果那样就具有确定的位置和确定的速度，即零速度。这就违反了不确定性原理，这个原理禁止同时精确地测量位置和速度。位置的不确定性乘上动量的不确定性必须大于称为普朗克常量的一定量。普朗克常量因为经常使用显得太长，所以我们用一个符号h来表示它。

这样一个单摆的基态，或最低能量的态，正如人们可以预料到的，不具有零能量。相反，甚至在一个单摆或者任何振动系统的基态之中，必须有一定的称为零点起伏的最小量。这些意味着单摆不必垂直下指，它还有在和垂直方向成小角度处被发现的概率（图2.10）。类似地，甚至在真空或者最低能的态，在麦克斯韦场中的波也不严格为零，而具有很小的量。单摆或者波的频率（每秒钟摆动的数目）越高，则基态的能量越高。

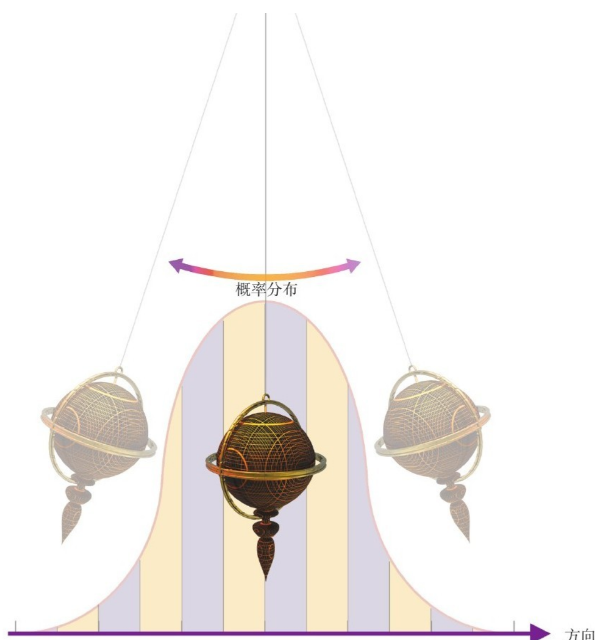


图2.10

具有概率分布的摆

根据海森伯原理，一个摆不可能绝对地指向下方并具有零速度。相反，量子论预言，甚至在最低的能态，摆都必须具有最小量的涨落。

这意味着，摆的位置由概率分布给定。在它的基态，最可能的位置是直接指向下方，但是它在和垂直夹一小角度上还有被找到的概率。

人们计算了麦克斯韦场和电子场的基态起伏，发现这种起伏使电子的表观质量和电荷都变成无限大，我们根本没有观测到这一点。然而，在20世纪40年代物理学家理查德·费恩曼、朱里安·施温格和朝永振一郎发展了一种协调的方法，除去或者“减掉”这些无限大，而且只要处理质量和电荷的有限的观测值。尽管如此，基态起伏仍然产生微小效应，这种效应可被测量到，并和实验符合得很好。杨振宁和罗伯特·米尔斯提出的理论中的杨-米尔斯场的无限大也可用类似的扣除方案排除掉。杨-米尔斯理论是麦克斯韦理论的一种推广，它描述另外两种称为弱核力和强核力的相互作用。然而，在量子引力论中基态起伏具有严重得多的效应。这里重复一下，每一波长各具基态能量。由于麦克斯韦场具有任意短的波长，所以在时空的任一区域中都具有无限数目的不同波长，并因此具有无限量的基态能。因为能量密度和物质一样是引力之源，这种无限大的能量密度表明，宇宙中存在足够的引力吸引，使时空卷曲成单独的一点，显然这并未发生。

人们也许会说基态起伏没有引力效应，以冀解决似乎在观测和理论之间的冲突，但是这也不可行。人们可以利用卡西米尔效应来检测基态起伏的能量。如果你把一对金属板相互平行地放置，并且让它们靠近。平板的效应是把符合在平板之间的波长的数目相对于外面的数目稍微减少一些。这就意味着，在平板之间的基态起伏的能量密度虽然仍为无限大，却比外界的能量密度少了有限量（图2.11）。这种能量密度差产生了将平板拉到一起的力量，实验已经观测到这种力量。在广义相对论中，力正和物质一样是引力的源。这样，如果无视这种能量差的引力效应则是不协调的。

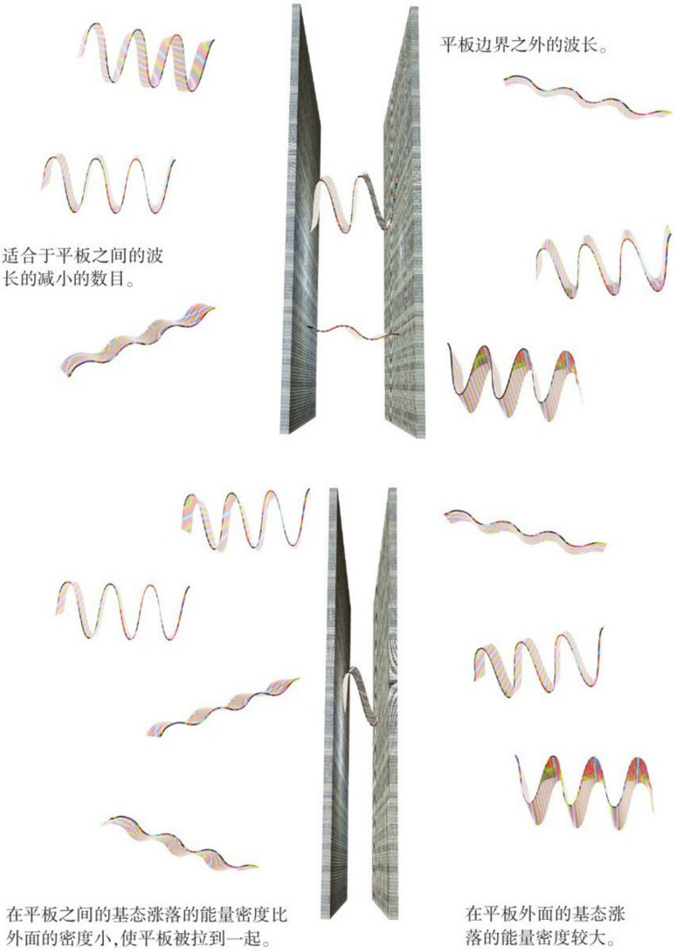


图2.11

卡西米尔效应

在平行金属板之间的一种很小的力称为卡西米尔效应，该效应在实验上证实了存在基态涨落。

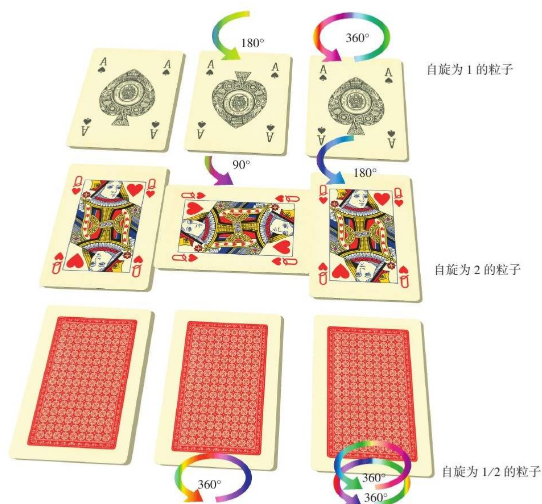


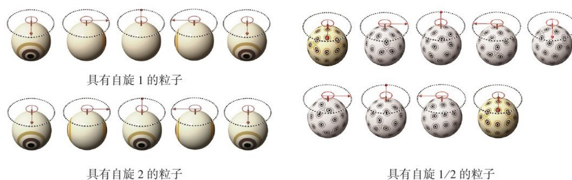
图2.12

自旋

所有粒子都具有称作自旋的性质，该性质和粒子从不同方向看起来什么样子相关联。人们可以用扑克牌来展示这一点。首先考虑黑桃么点。只有把它转动一整圈或者360°，它才显得相同。所以人们说它的自旋为1。

另一方面，红心皇后有两个头。所以只要转动半圈或者180°，就变成一样。所以人们说它的自旋为2。类似地，人们可以想象具有自旋3或者更高的对象，它们在转动更小角度下显得相同。

自旋越高，使粒子显得相同的旋转所需要的整圈部分就越小。但是以下事实令人印象深刻，存在旋转两整圈才显得相同的粒子，这种粒子被称为具有自旋1/2。



通常的数

A×B＝B×A
格拉斯曼数
A×B＝-B×A

解决这个问题的另一种可能的办法，是假定存在爱因斯坦为了得到宇宙的静态模型引进的宇宙常数。如果该常数具有无限大负值，它就可能精确地对消自由空间中的基态能量的无限大正值。但是这个宇宙常数似乎专为这个目的，而且必须被无限准确地调准。

20世纪70年代人们非常幸运地发现了一种崭新的对称。这种对称机制将从基态起伏引起的无穷大对消了。超对称是我们现代数学模型的一个特征，它可以不同的方式来描述。一种方式是讲，时空除了我们体验到的维以外还有额外的维。这些维称为格拉斯曼维，因为它们是用所谓的格拉斯曼变量的数而不用通常的实数来度量。通常的数是可交换的，也就是说你进行乘法时乘数的顺序无关紧要：6乘以4和4乘以6相等。但是格拉斯曼变量是反交换的，x乘以y和-y乘以x相等。



图2.13

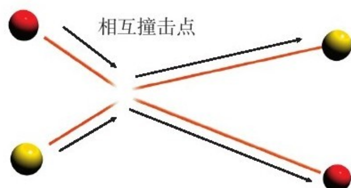
宇宙中的所有已知粒子可以分成两组，费米子或者玻色子。费米子的自旋为半整数（例如自旋为1/2）的粒子，它们构成通常的物体。它们的基态能量是负的。

玻色子的自旋为整数（例如自旋为0，1，2）的粒子，它们在费米子之间引起力，诸如引力和光。它们的基态能量是正的。超引力理论认为，每一种费米子和玻色子都具有其自旋比它大或小1/2的“超伴侣”。例如，光子（它是玻色子）的自旋为1。它的基态能量是正的。光子的超伴侣，光微子的自旋为1/2，使它成为费米子。所以其基态能量是负的。

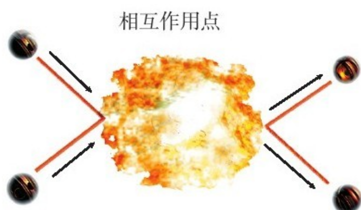
在这种超引力方案中我们得到同等数目的玻色子和费米子。玻色子的基态能量

处于天平正的一端，而费米子处于天平负的一端，基态能量就相互抵消了，因而消除了最大的无限大。

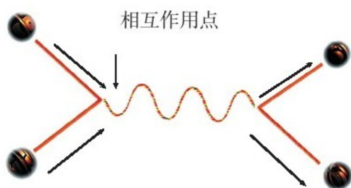
粒子行为的模型



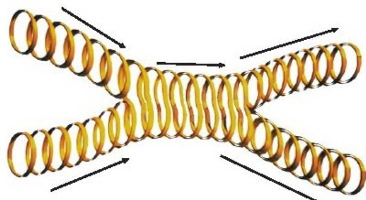
1　如果点粒子作为分立的像撞球那样的元素真实存在，那么当两个粒子碰撞时，它们的路径就会被偏离到两个新的轨道去。



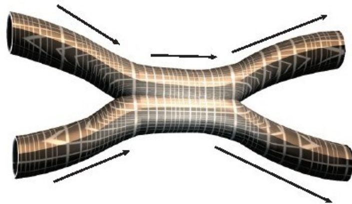
2　这是两个粒子相互作用所呈现的景象，虽然其效应更生动得多。



3　量子场论展示，像电子和它的反粒子正电子的两个粒子碰撞。在这个过程中，它们在一次能量迸发时短暂地相互湮灭，而且创生一个光子。光子再释放能量，产生了另一电子-正电子对。这仍然显得仿佛它们的路径仅仅被偏离到新的轨道去。



4　如果粒子不是零维的点而是一维的弦，在弦上振荡的圈环作为一个电子或正电子而振动，电子和正电子碰撞，那么在相互湮灭时创生了新的具有不同振动模式的弦。新弦释放能量，分成两个继续沿着新的轨道的弦。



5　如果不把原先那些弦看成分立的时刻，而把它们看成在时间中的连续的历史，那么所得到的弦就变成一个弦世界片。

超对称首先用于无论通常数的维还是格拉斯曼维都是平坦而不是弯曲的时空中去消除物质场和杨-米尔斯场的无穷大。但是把它推广到通常数和格拉斯曼维的弯曲的情形是很自然的事。这就导致一些称为超引力的理论，它们分别具有不同数目的超对称。超对称的一个推论是，每一种场或粒子应有一个其自旋比它大或小二分之一的“超伴侣”（图2.12）。

玻色子，也就是其自旋为整数（0，1，2等）的场的基态能量是正的。另一方面，费米子，也就是其自旋为半整数（1/2，3/2等）的场的基态能量是负的。因为存在相等数目的玻色子和费米子，超引力理论中的最大的无限大就被抵消了（图2.13）。

或许还遗留下更小的但是仍然无限的量的可能性。无人有足够的耐心，去计算这些理论究竟是否完全有限。人们认为，一名能干的学生要花费200年才能完成此事，而且你何以得知他是否在第二页就犯错误了？直到1985年大多数人仍然相信，最超对称的超引力理论可避免无限大。

然后时尚突然改变。人们宣称，没有理由期望超引力理论可以避免无限大，而这意味着，它们作为理论而言，具有致命的缺陷。相反，人们宣称，称为超对称弦理论是仅有的把引力和量子理论合并的方法。弦，正如在日常经验中的它的同名物，是一维的延展的物体。它们只有长度。在弦理论中弦在时空背景中运动。弦上的涟漪被解释为粒子（图2.14）。

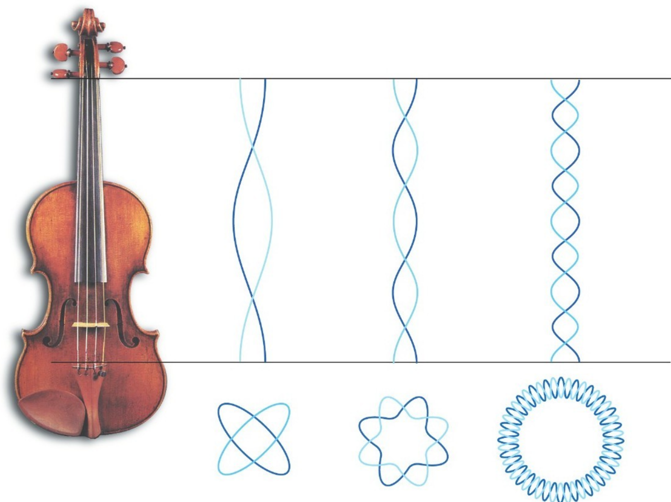


图2.14　弦振动

在弦理论中，基本的对象不是占据空间单独一点的粒子，而是一维的弦。这些弦可有端点，或者它们可以自己连接成一个闭合圈环。

正如小提琴上的弦，弦理论中的弦维持一定的振荡模式，或者共振频率，其波长准确地配合两个端点之间的长度。

但是小提琴弦的不同共振频率导致不同的音阶，而弦的不同振动导致不同的质量和力荷，它们被解释为基本粒子。粗略地讲，弦振动的波长越短，则粒子的质量越大。

如果弦除了它们通常数的维外，还有格拉斯曼维，涟漪就对应于玻色子和费米子。在这种情形下，正的和负的基态能就会准确对消到甚至连较小种类的无限大都不存在。人们宣布超弦是TOE，也就是万物的理论。

未来的科学史家将会发现，去描绘理论物理学家中的思潮变化是很有趣的事。在好些年里，弦理论至高无上，而超引力只能作为在低能下有效的近似理论而受到轻视。限定词“低能”尤其晦气，尽管此处低能是指其能量比一百亿亿倍的在TNT爆炸中粒子能量更低的粒子。如果超引力仅仅是低能近似，它就不能被宣布为宇宙的基本理论。相反，五种可能的超弦理论中的一种被认为是基本理论。但是五种弦理论中的哪一种描述我们的宇宙呢？还有，除了弦被描绘成具有一个空间维和一个时间维的通过平坦时空背景运动的面的近似以外，弦理论应如何表述呢？难道弦不会弯曲背景时空吗？

1985年后，弦理论不是完整的图象这一点逐渐清晰了。一开始，人

们意识到，弦只不过是延展成多于一维的物体的广泛族类中的一员。保罗·汤森，他正如我一样是剑桥的应用数学和理论物理系的成员，他关于这些东西做了许多基本研究，将这些东西命名为“p膜”。一个p膜在p个方向上有长度。这样p＝1的膜是弦，p＝2的膜是面或者薄膜，等等（图2.15）。似乎没有理由对p＝1的弦的情形比其他可能的p值更宠爱。相反地，我们应该采用p膜的民主原则：所有p膜都是生来平等的。

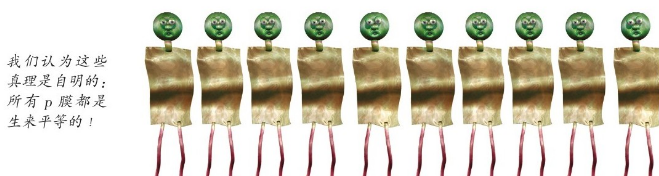
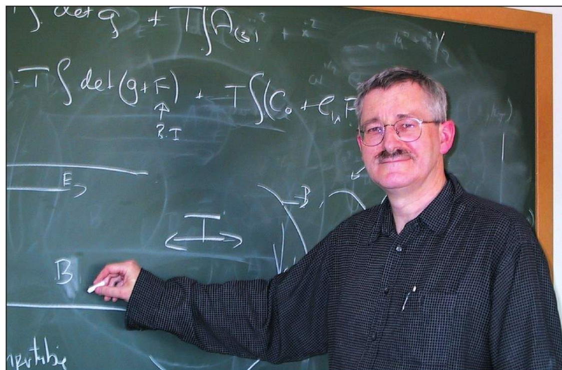


图2.15　p膜

p膜是在p维延展的物体。其中特殊情形是弦p＝1和膜p＝2，但在十维或十一维时空中可能有更大值的p。p维中的一些或全部经常被卷曲起来，像一个圆环似的。

在十维或者十一维的超引力理论的方程中可以找到所有p膜的解。十维或十一维听起来不太像我们体验的时空。人们的观念是，其余的六维或七维被弯卷成这么小，小到我们觉察不到；我们只知悉剩下的四个宏观的几乎平坦的维。

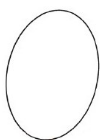
我应该说，对于额外维的存在，我本人一直持狐疑态度。但是，对于我这样的一名实证主义者而言，“额外维的确存在吗？”的问题是没有意义的。人们最多只能问：具有额外维的数学模型能很好地描述宇宙吗？我们还没有任何不用额外维便无法解释的观测。然而，我们用在日内瓦的大型强子碰撞机有可能观察到它们。但是，使包括我在内的许多人的，必须认真地接受具有额外维的模型的信服理由是，在这些模型之间存在一种所谓对偶性的意外的关系之网。这些对偶性显示，所有这些模型在本质上都是等效的；也就是说，它们只不过是同一基本理论的不同方面，这个基本理论已被叫做M-理论。怀疑这些对偶性之网是我们在正确轨道上的征兆，有点像相信上帝把化石放在岩石中去是为了误导达尔文去提出生命演化的理论。



保罗·汤森的照片，p膜的书呆子



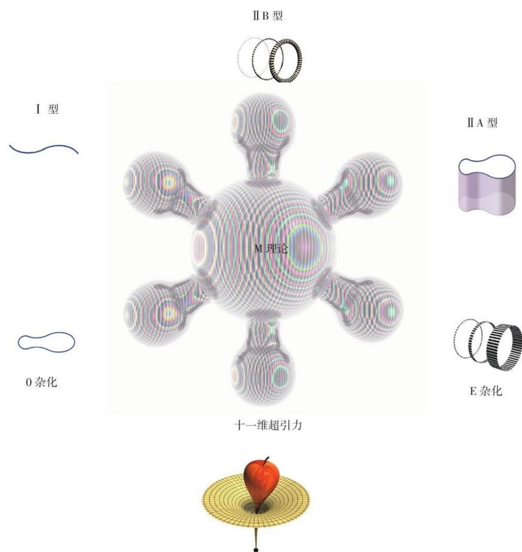
我们宇宙的空间结构既具有展开的也具有卷曲的维。如果膜被卷曲起来则能看得更清楚。



一个1膜或者卷曲的弦。

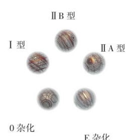


一个卷曲成圆环的2膜片。

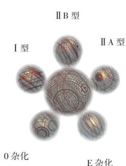


存在一个所谓的对偶性的关系网，它把所有五种弦理论以及十一维超引力连接在一起。对偶性暗示，不同的弦理论只不过是同一基本理论的不同表述，这个基本理论已被命名为M理论。

图2.16　一种统一的框架？



90年代中期之前找到5种不同的弦理论，它们相互分离而且没有联系。



M理论在一个单一的理论框架中把5种弦理论统一起来，但是人们还不能理解它的许多性质。

这些对偶性表明，所有五种超弦理论都描述同样的物理，而且它们在物理上也和超引力等效（图2.16）。人们不能讲超弦比超引力更基本，反之亦然。人们宁愿说，它们是同一基本理论的不同表述，对在不同情形下的计算各有用处。因为弦理论没有任何无限大，所以可以很方

便地用来计算一些高能粒子碰撞以及散射时会发生什么。然而，在描述非常大量数目的粒子的能量如何弯曲宇宙或者形成束缚态，譬如黑洞时没有多大用处。对于这些情形，人们需要超引力。超引力基本上是爱因斯坦的弯曲时空的理论加上一些额外种类的物质。这正是我以下主要使用的图象。

为了描述量子理论如何赋予时间和空间以形状，引进虚时间的观念是有助益的。虚时间听起来有点像科学幻想，但其实是意义明确的数学概念：它是用所谓的虚数度量的时间。人们可以将诸如1，2，-3，5等通常的实数想成对应于从左至右伸展的一根线上的位置：零在正当中，正实数在右边，而负实数在左边（图2.17）。

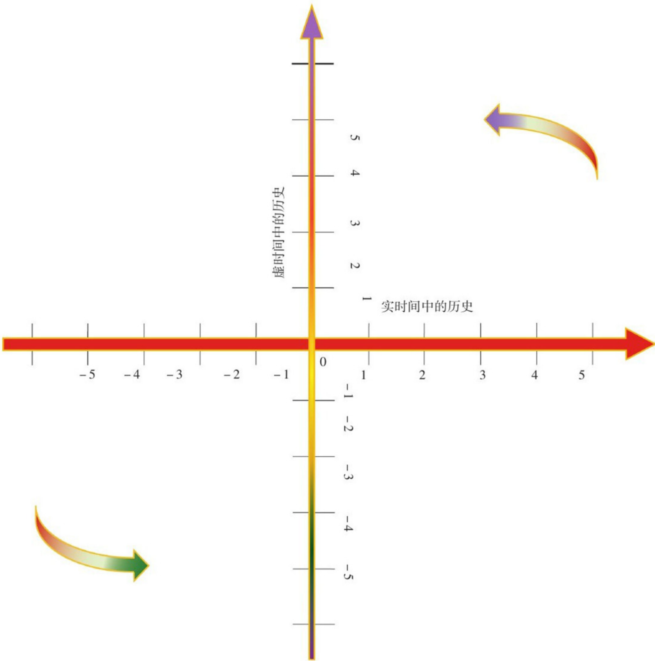


图2.17

人们可以建立一个数学模型，在这模型中存在和通常的实时间成直角的虚时间方向。该模型的规则是，按照在实时间中的历史确定在虚时间中的历史，反之亦然。

虚数对应于一根垂直线上的位置：零又是在中点，正虚数画在上头，而负虚数画在下面。这样虚数可被认为是与通常的实数夹直角的新型的数。因为它们是一种数学的构造物，所以不需要实体的实现；人们

不能有虚数个橘子或者虚数的信用卡账单（图2.18）。

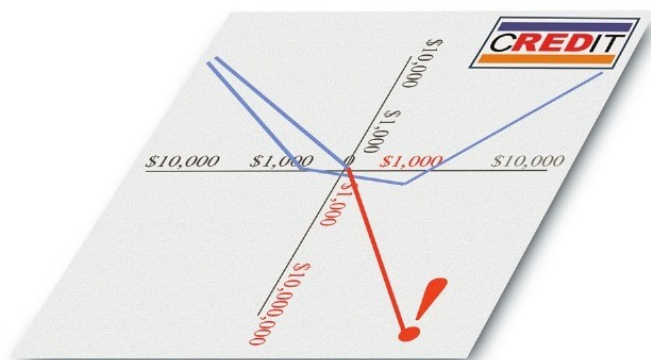


图2.18

虚数是一种数学的构造物。你不会有虚的信用卡账单。

人们也许会认为，这意味着虚数只不过是一种数学游戏，与现实世界毫不相干。然而从实证主义哲学观点看，人们不能确定何为真实。人们所能做的只不过是去找哪种数学模型描述我们生活其中的宇宙。人们发现牵涉到虚时间的一种数学模型不仅预言了我们已经观测到的效应，而且预言了我们尚未能观测到，但因为其他原因仍然坚信的效应。那么何为实何为虚呢？这个差异是否仅存在于我们的头脑之中呢？

爱因斯坦经典（也就是非量子）广义相对论把实时间和三维空间合并成四维时空。但是实时间方向和三个空间方向可被识别开来；一位观察者的世界线或历史总是在实时间方向增加（也就是说，时间总是从过去运动到未来），但是它在三维空间的任何方向上可以增加或者减少。换言之，人们可以在空间中而非时间中颠倒方向（图2.19）。

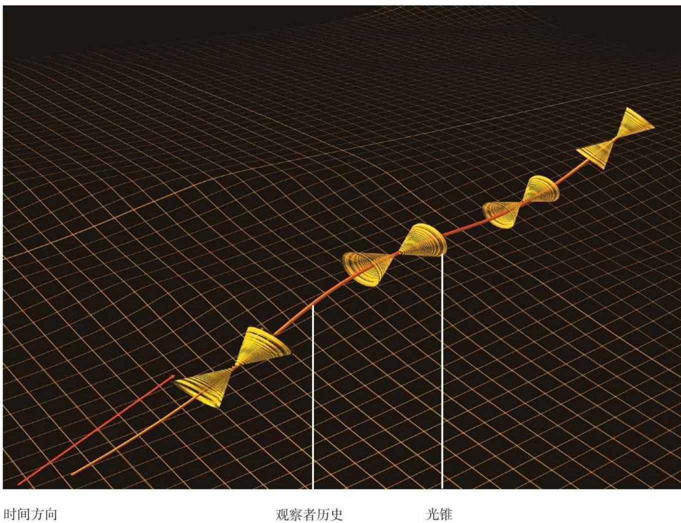
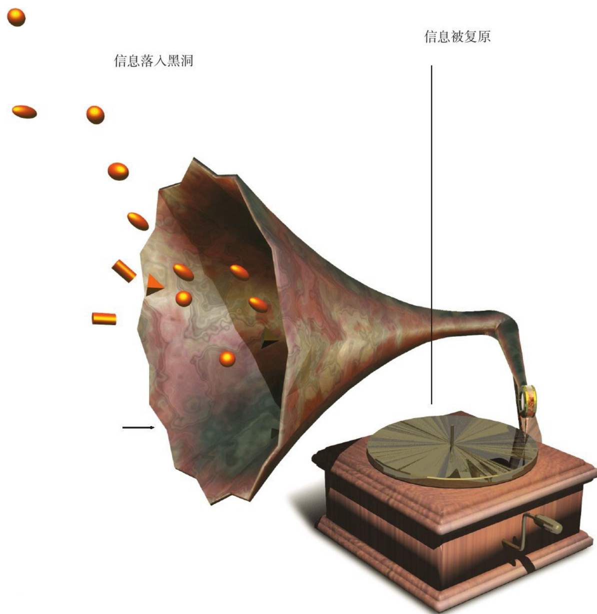


图2.19

在经典广义相对论的实时时空中，因为时间只沿着一位观察者的历史增加，不像空间方向那样可以沿着那历史增大或者减小，时间就和空间方向区分开来。另一方面，量子理论的虚时间方向，正像另一个空间方向，于是它能增大也能减小。

另一方面，因为虚时间和实时间夹一直角，它的行为犹如空间的第四个方向。因此，它比通常的实时间的铁轨具有更丰富多彩的可能性。铁轨只可能有开端或者终结或者绕着圆圈。正是在这个虚的意义上，时间具有形状。





一个黑洞的熵——或者内部态的数目——的面积公式暗示，有关落进黑洞的东西的信息可以像在唱片上一样被储存，当黑洞蒸发时再放出来。

$$S = \frac{Akc^3}{4\hbar G}$$

黑洞熵公式

A黑洞事件视界的面积

$\hbar$普朗克常量

k玻尔兹曼常量

G牛顿引力常量

c光速

S熵

为了领略一些可能性，考虑一个虚时间的时空，那是一个像地球表面的球面。假定虚时间是纬度（图2.20，见61页）。那么宇宙在虚时间中的历史就从南极起始。这样，“在开端之前发生了什么”的诘问就变得毫无意义。这样的时间根本无法定义，恰如不存在比南极更南的点一样。南极是地球表面上完全规则的点，相同的定律在那里正如在其他点

一样成立。这暗示着，宇宙在虚时间中的开端可以是时空的正则点，而且相同的定律在开端处正如在宇宙的其他地方一样成立（宇宙的量子起源和演化将在下一章中讨论）。



南

虚时间作为纬度

图2.20　虚时间

在一个球面的虚时空中，虚时间方向可代表离开南极的距离。随着人们往北运动，离南极等距离的纬度圈变大，这对应着宇宙随虚时间的膨胀。宇宙在赤道处达到最大尺度，然后随着虚时间的增加而重新收缩于北极处的单独一点。尽管宇宙在两极尺度为零，但这些点不是奇点，正如地球表面上的北南两极完全是正则点。这暗示着，宇宙在虚时间中的起源可为时空中的正则点。

北



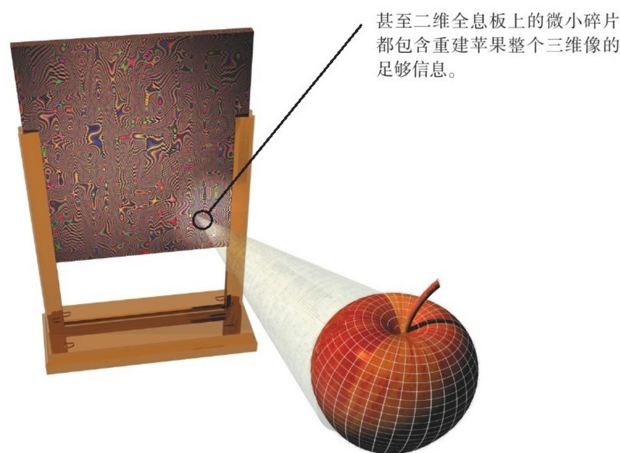
虚时间作为经度
它们在北南两极相遇

图2.21

在一个球面的时空中的虚时间方向也可对应于经度，而非纬度。因为所有经线在北南两极相

遇，时间在两极停滞不前；虚时间的增加使人们留在同一点，正如在地球的北极上向西走的人们仍然留在北极上一样。

可以把虚时间当作地球上的经度来阐明另一种可能的行为。所有经线都在北极和南极相遇（图2.21，见61页）。这样时间在那里静止，这是在这样的意义上来讲的，即虚时间或经度的增加，让人们停留在同一点。这和在一个黑洞视界上通常时间显得静止的方式非常相似。我们已经认识到这种实和虚时间的静止（两者都静止或者都不静止）意味着时空具有温度，正如我在黑洞情形下所发现的那样。黑洞不仅有温度，它的行为方式似乎还表明它具有称作熵的量。熵是黑洞内部状态（可在其内部构造的方式）数目的度量，这是具有给定的质量、旋转和电荷的黑洞允许的所有内部状态。作为黑洞外面的观察者只能观测到黑洞的这三种参数，而这些内部状态在他们看来没什么差别。我于1974年发现的一个非常简单的公式给出了黑洞的熵。它等于黑洞视界的面积：视界面积的每一基本单位都记载关于黑洞内部状态的一比特的信息。这表明在量子引力和热力学之间存在一个深刻的联系。热力学即热的科学（其中包括熵的研究）。它还暗示，量子引力能展示所谓的全息性（图2.22，见65页）。



全息原理

得知围绕黑洞的视界表面积是黑洞熵的测度后，人们提出，任何闭合空间区域的最大熵永远不能超过其外接表面积的

1/4。由于熵只不过是包含在一个系统中的总信息的测度，这便暗示，在和三维世界中的所有现象相关联的信息能被存储在它的二维边界上，正如一个全息像一样。在一定的意义上讲，这个世界是二维的。

有关一个时空区域内的量子态的信息可以以某种方式被编码在该区域的少两维的边界上。这就像全息术把三维的影像携带在二维的表面上的方法。如果把量子引力和全息原理相合并，这也许意味着我们能跟踪发生于黑洞之内的东西。如果我们能够预言来自黑洞的辐射，这一点则是重要的。如果我们不能做到，我们将不能像原先以为的那样充分地预言将来。这将在第四章中讨论。我们在第七章中将再次讨论全息学。看来我们也许生活在一张3-膜，即一个四维（三维空间加一维时间）面上。它是五维区域的边界，而其余的维被卷曲得非常小。膜上的世界的态记录着发生在五维区域内一切的密码。

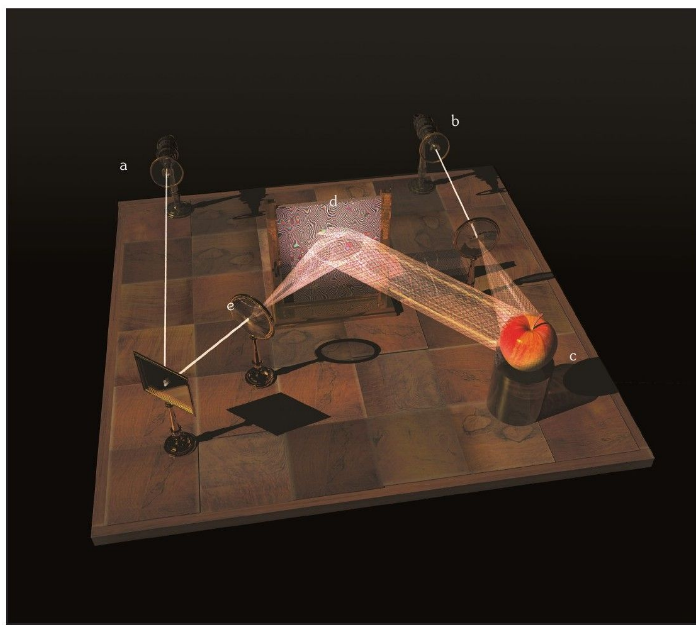


图2.22　全息术基本上是波模式的干涉现象。当从单一激光来的光被分成分离的两束（a）和（b）时产生全息像。其中一束（b）从物体（c）反射到一个感光板（d）上。另一束（a）通过一个透镜（e）并且和（b）的反射光相遇，在板上产生干涉模式。

当一束激光透射过该显影过的感光板时，一个原先物体的完整三维像就会出现。一位观察者可在这个全息像周围移动位置，他能够看到从正常的照片看不到的所有隐藏的表面。

左面的感光板的二维表面和正常的照片不同，具有令人吃惊的性质，即它表面的任何微小碎片都包含有重建整个像所需要的全部信息。

第三章
果壳中的宇宙

宇宙具有多重历史，每一个历史都是由微小的硬果确定的。





航天飞机正在负责改善哈勃空间望远镜的透镜和镜子。在下面可以看到澳大利亚。

即便把我关在果壳之中熏

仍然自以为无限空间之王

——莎士比亚，
《哈姆雷特》第二幕第二场

时哈姆雷特也许是想说，虽然我们人类的身体受到许多限制，但是我们的精神却能自由地探索整个宇宙，甚至勇敢地闯入连“星际航行”都畏缩不前之处——噩梦不再纠缠的话。

宇宙究竟是无限的，或者仅仅是非常浩渺的呢？它是永恒存在的，或者仅仅是年代久远的呢？我们有限的思维何以理解无限的宇宙？甚至仅仅有这种企图是否就已经过于自信？我们是否冒着普罗米修斯命运的

风险？在经典的神话中，他为了人类用火从宙斯处盗取火种，因为愚勇而受惩罚，他被链锁在岩石上，让鹰啄食他的肝脏。



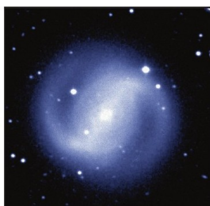
普罗米修斯。卮特鲁里亚瓶饰绘画，公元前6世纪。

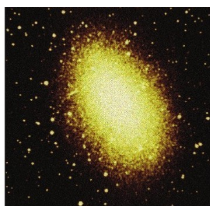
尽管这些警戒的传说，我仍然相信，我们能够而且应该试图理解宇宙。我们在这方面已有了显著的进展，尤其是在前几年。当然，我们还未得到完整的图象，但已为期不远。

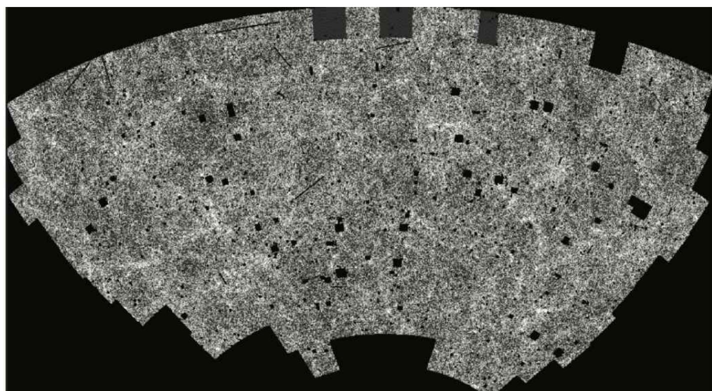
空间的最明显之处是它无限地向外延伸。现代仪器证实了这一点，比如哈勃望远镜允许我们探测太空深处。我们看到的是各种形状和尺度的数以亿万计的星系（见70页，图3.1）。每个星系都包含难以计数的亿万个恒星，其中许多恒星还被行星环绕。我们生活在围绕着一个恒星公转的行星之上，而这个恒星位于螺旋形银河系的外臂上，螺旋臂上的尘埃遮住了我们在银河系平面上的宇宙视野，但是我们在该平面的每一边的方向圆锥中的视线都非常清晰，而且能够画出遥远星系的位置（图3.2）。我们发现星系大体均匀地分布于整个太空，有一些局部的聚集和空洞。星系密度在非常大的距离外显得有些下降，但这也许是因为它们如此遥远而黯淡，以至于我们看不见。尽我们所知，宇宙在空间中永远延伸出去（见72页，图3.3）。



螺旋星系NGC4414


棒旋星系NGC4314


椭圆星系NGC147


图3.1　当我们观察宇宙的深处，我们看到亿万个星系。星系可具有不同形状和尺度，它们要么是椭圆状的，要么是螺旋状的，就像我们自身的银河系那样。

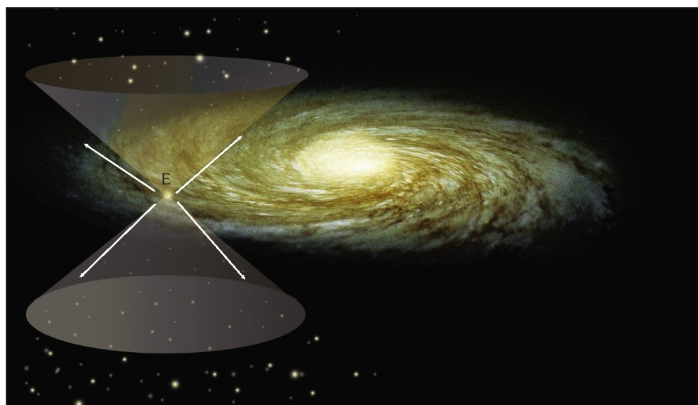


图3.2

我们的行星地球（E）围绕着位于螺旋的银河系外部区域的太阳公转。螺旋

臂中的恒星尘埃挡住了我们在星系面上的视线，但是我们在该平面的任一边都有一个清晰的视域。

尽管宇宙似乎在空间的每一位置上都很相同，它肯定随时间而变化。这一点直到20世纪早期才被意识到。在此之前，人们认为，宇宙本质上是时间不变的。它也许存在了无限长的时间，但是这似乎会导致荒谬的结论。如果恒星已经辐射了无限长的时间，那么它们就会把宇宙加热到和它们相同的温度。因为每一道视线都会要么终结于恒星的表面，要么终结于被加热至和恒星一样炽热的尘埃云团之上，所以甚至在夜晚，整个天空都会和太阳一样明亮（图3.4）。

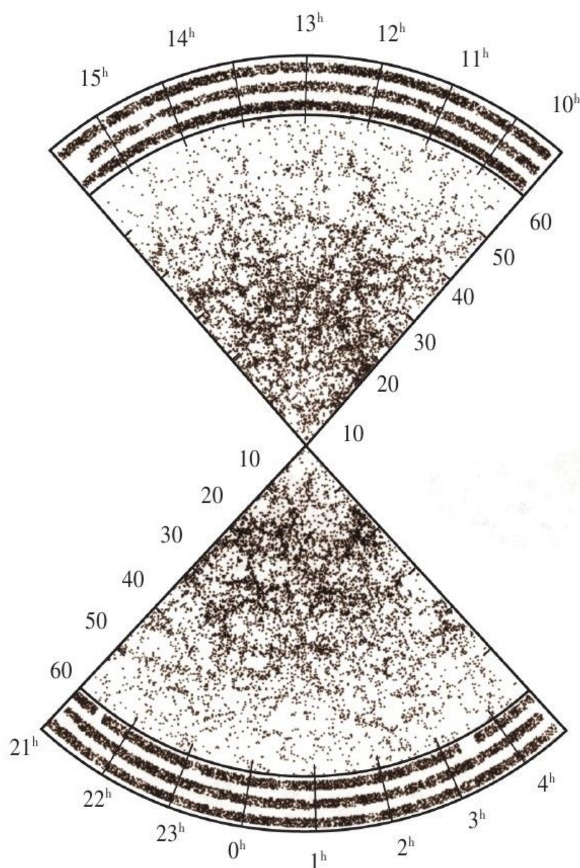


图3.3

我们发现，除了一些局部的聚集外，星系大体均匀地分布于整个空间。

我们所有人都进行过夜空是黑的观察，这是非常重要的。它意味着

宇宙不能以我们今天看到的状态存在了无限久的时间。过去一定发生过某些事情，使得恒星在有限的过去时刻点亮，这意味着从非常遥远恒星来的光线尚未到达我们这里。这就解释了夜空为何不在每一个方向发光。

如果恒星仅仅是永久地待在这里，为何它们在几十亿年前忽然点亮呢？是什么钟通知它们发亮的瞬间呢？正如我们看到过的，这个问题使那些哲学家，例如伊曼努尔·康德陷入迷思。他们相信，宇宙已经存在了无限久时间。但是对于大多数人而言，它和宇宙在仅仅几千年以前从和现在非常相同的初始状态下创生的观念相一致。

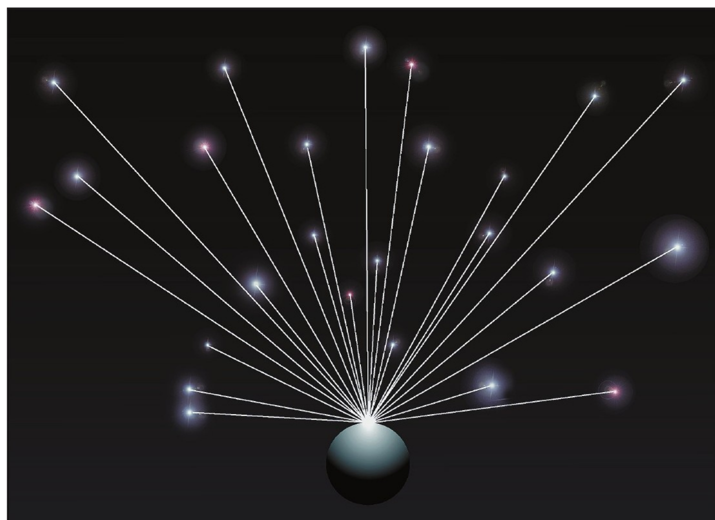
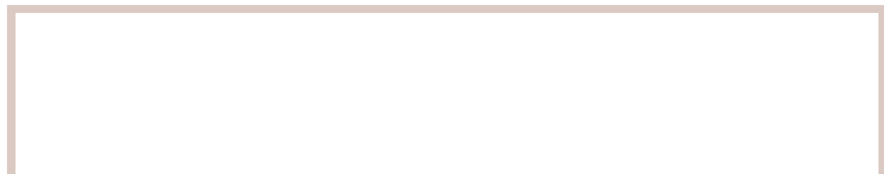
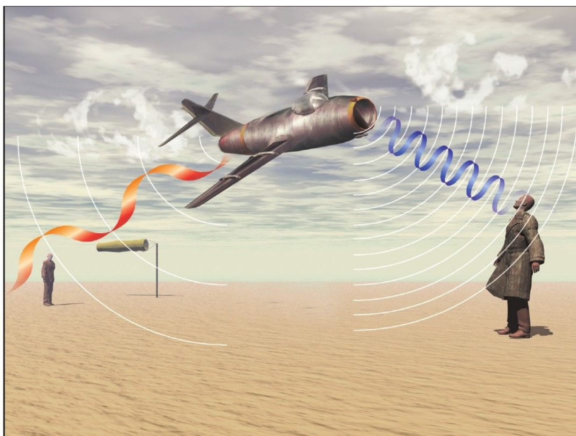


图3.4

如果宇宙是静态的，而且在每一方向都是无限的，那么每根视线都会终结于一个恒星上，这就使得夜空和太阳一样明亮。

然而，20世纪20年代韦斯托·斯里弗和埃德温·哈勃的观测开始偏离这种观念。1923年哈勃发现了许多称为星云的黯淡的光斑，实际上是其他星系，那些正像我们太阳，但在遥远距离之外的恒星的巨大集团。它们之所以显得这么微小和黯淡，其距离一定非常遥远，甚至连光线都要花费几百万年甚至几十亿年才能到达我们这里。这表明，宇宙的起始不可能发生在区区几千年以前。





多普勒效应

称作多普勒效应的速度和波长之间的关系是一种日常经验。

聆听从头顶飞过的飞机：当它趋近我们时，其发动机的音调升高，而当它离开并消失时，其音调降低。

高音调对应于较短波长（相邻波峰之间的距离）和较高频率（每秒钟的波动数目）。

这是因为在飞机向你飞来时，当它发射下一个波峰时，它离你较近，减小了波峰之间的距离。

类似地，当飞机飞离时，其波长增长，而且你感知的音调变低。

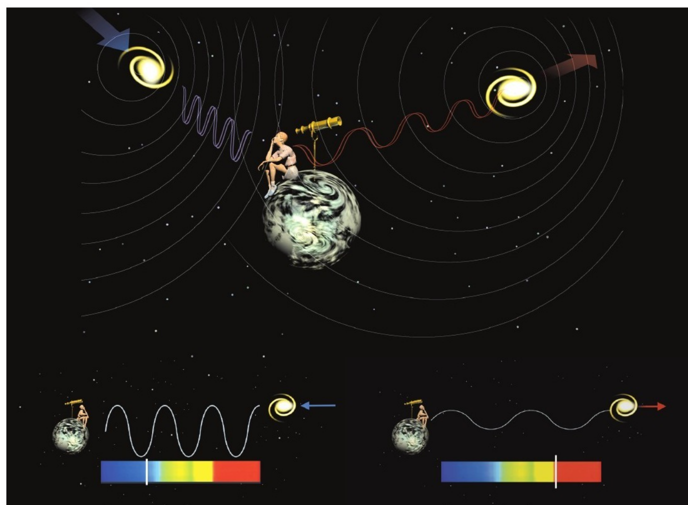
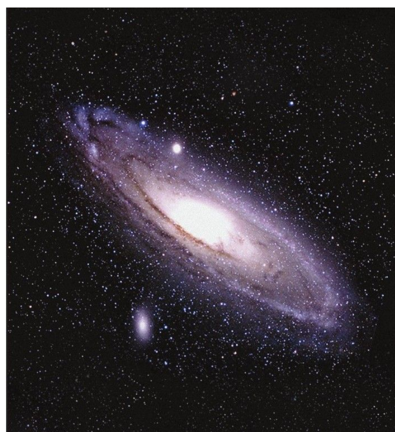


图3.5

多普勒效应对于光波也是正确的。如果一个星系和地球之间的距离保持不变，则光谱的特征线在正常的标准的位置出现。然而，如果星系离开我们运动，则波就被伸延或者拉长，而特征线就向红端移动（右边）。如果星系趋近我们运动，那么波就被压缩，而谱线就向蓝端移动（左边）。

但是哈勃发现的第二桩事情甚至更加非凡。天文学家们已经通晓，从分析来自其他星系的光线，可以测量它们是趋近还是远离我们运动（图3.5）。使他们大为惊奇的是，他们发现，几乎所有的星系都运动离去。此外，它们距我们越远，则离开运动得越快。正是哈勃认识到这个发现的戏剧性含义：在大尺度上，每一个星系都从其余每个星系运动离去。宇宙正在膨胀（图3.6）。

宇宙膨胀的发现是20世纪的伟大的智力革命之一。它完全出乎意外，而且彻底改变了有关宇宙起源的讨论。如果星系正在相互运动离开，则它们在过去必然更加接近。我们从现在的膨胀率，可以估计它们在100亿～150亿年前必须非常接近。正如在上一章中描述的，罗杰·彭罗斯和我能够证明，爱因斯坦的广义相对论意味着，宇宙和时间本身有过在一个可怕的爆炸中的开端。这就解释了夜空为何黑暗：恒星发光的时间不可能比100亿～150亿年，也就是从大爆炸迄今的时间更久。



哈勃和斯里弗测量了我们邻居星系，仙女座星云。

斯里弗和哈勃在1910～1930年发现年表。

1912年——斯里弗测量了来自四个星云的光，发现其中三个红移，而仙女座星云蓝移。他的解释是仙女座星云向着我们运动，而其他星云离开我们运动。

1912～1914年——斯里弗又测量了12个星云。除了一个以外所有都红移。

1914年——斯里弗在美国天文学会报告他的发现。哈勃听到这个报告。

1918年——哈勃开始研究星云。

1923年——哈勃确定螺旋星云（包括仙女座星云）是其他星系。

1914～1925年——斯里弗和其他人不断测量多普勒位移。1925年的成绩是43个红移和2个蓝移。

1929年——哈勃和密尔顿·胡玛逊继续测量多普勒位移，并且发现在大尺度上，每一个星系都显得从任何其余的星系退行后，宣布他们的发现，即宇宙正在膨胀。

我们对如下观念熟视无睹，即事件总是由更早的事件引起，后者依

序又是由比它还要早的事件引起。存在一个向过去延展的因果性之链。但是假定这条链有一个开端。假定存在第一个事件，那么它的肇因又是什么呢？许多科学家不愿意面对这个问题。他们企图逃避它，要么像俄国人那样宣布宇宙没有开端，要么坚持说宇宙的开端不属于科学王国的范畴，而是属于形而上学或宗教。依我看来，这不是任何真正的科学家应该采取的立场。如果科学定律在宇宙的开端处暂时失效，它们不也可以在其他时间失效吗？如果定律只能有时成立则不能称之为定律。我们必须试图在科学的基础上理解宇宙的开端。它也许是超过我们能力之外的任务，但是我们至少应该进行尝试。



图3.6

埃德温·哈勃于1930年使用100英寸的威尔逊山望远镜。

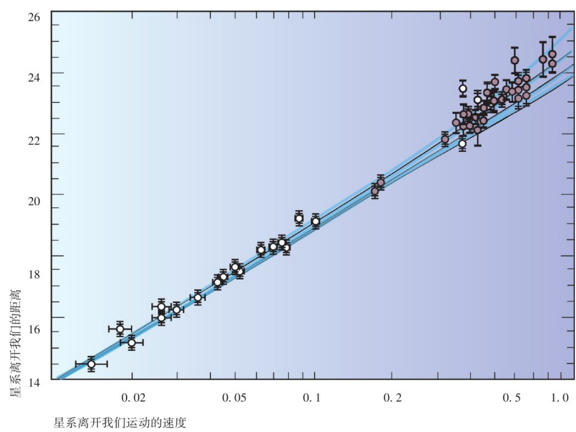
哈勃定律

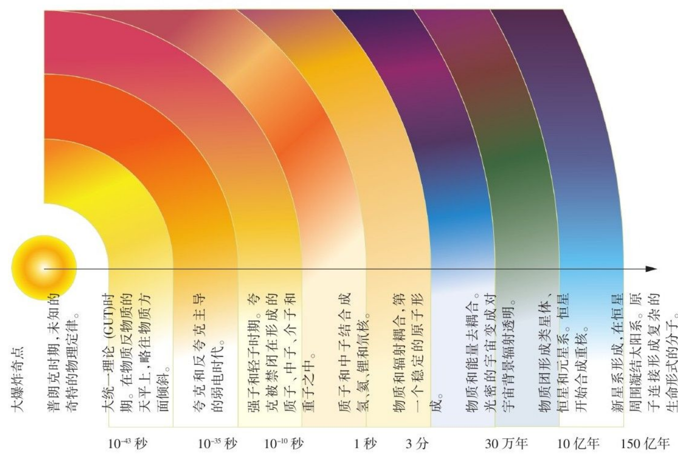
埃德温·哈勃在分析了从其他星系来的光之后，在20世纪20年代发现，几乎所有星系都离开我们而去，其退行的速度V和它们离开地球的距离R成正比，即V＝H×R。

这一称作哈勃定律的重要观察确认了宇宙正在膨胀，其哈勃常数H为膨胀率。

下图显示星系红移的最近观测结果，在离开我们极其巨大的距离下确证了哈勃定律。

在图中大距离处的微小上扬表明，膨胀正在加速，这也许是由真空能量引起的。





热大爆炸

如果广义相对论是正确的，那么宇宙就在具有无限温度和密度的大爆炸奇点起始。随着宇宙的膨胀，辐射的温度降低。大约在大爆炸后的百分之一秒，温度为1000亿度，宇宙大多数成分为光子、电子和中微子（极轻的粒子），和它们的反粒子，还有某些质子和中子。在以后的3分钟，当宇宙冷却至大约10亿度，质子和中子开始结合形成氦、氢和其他轻元素的核。

几十万年以后，当温度降低至几千度，电子就缓慢到这种程度，轻核能够将它们捕获而形成原子。然而，构造我们的诸如碳和氧之类的更重元素，直到10亿年后才在恒星的中心燃烧氦而形成。

1948年科学家乔治·伽莫夫在一篇和拉夫·阿尔法合作的论文中首先提出宇宙致密的热的早期的这一图象。他们在该论文中作出惊人的预言，从这一非常热的早期阶段来的辐射迄今还应该留在周围。1965年物理学家阿诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊观察到宇宙微波背景辐射，证实了他们的预言。



彭罗斯和我证明的定理指出，宇宙必须有过一个开端，这些定理并没有对开端的性质给出很多信息。它们指出，宇宙从一个大爆炸的一点起始。在大爆炸处整个宇宙和其中的一切都被挤压到这个无限密度的单一的点中。爱因斯坦的广义相对论在这一点失效，所以不能被用来预言宇宙是如何起始的。人们面临的局面似乎是，宇宙起源的问题属于科学范畴之外。



科学家不应满足于这个结论。正如在第一章和第二章中指出的，广义相对论在大爆炸邻近失效的原因是，它没有和不确定性原理相合并。爱因斯坦基于上帝不掷骰子的论断反对量子理论中的这个随机元素。然而所有证据表明，上帝是一名地道的赌徒。人们可以将宇宙认为是一个庞大的赌场，在每一个场合下骰子都在滚动或者轮子都在旋转（图3.7）。因为在你每回投掷骰子或者转动轮子之际都有输钱的风险，你也许会认为开赌场是一种非常冒险的营生。但在非常多次的赌博之后，虽然不能预言任何特定赌博的结果，却能预言得失的平均结果（图3.8）。赌场的经营者保证概率平均的结果对他们有利。这就是为什么赌场的经营者如此富裕。你赢他们的仅有机会是把你所有的钱押下去掷几回骰子

或者转几回赌轮。

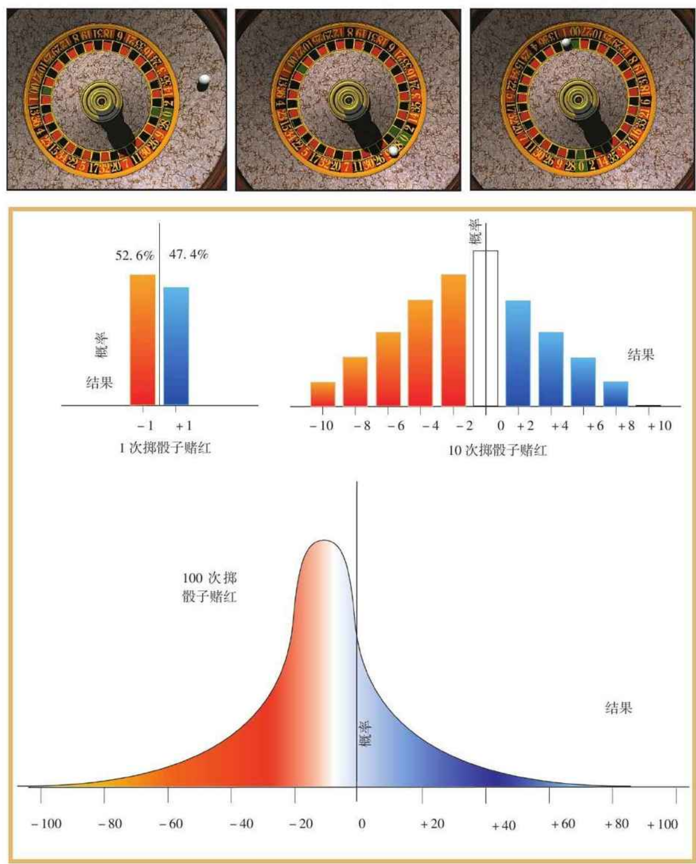


图3.7和图3.8

如果一位赌客多次掷骰子赌红，由于单次掷骰子的结果都被平均了，人们可以相当精确地预言它的回报。

另一方面，任何特定的赌博的结果是不可预言的。

宇宙的情景也是一样。当宇宙尺度很大，正如它今天这样时，骰子被投掷的次数极为巨大，其平均结果就会得出某种可预见的东西。这就是为何对于大系统经典定律有效的原因。但是，当宇宙尺度非常微小时，正如它在邻近大爆炸的时刻，投掷骰子的次数很少，而不确定性原理则非常重要。

因为宇宙不停地滚动骰子，看看下一步还会发生什么，它就不像人们以为的那样仅仅存在一个历史。相反地，宇宙应该拥有所有可能的历史，每种历史各有其概率。宇宙必须有这样的一种历史，伯利兹囊括了

奥林匹克运动会的所有金牌，虽然也许其概率很小。

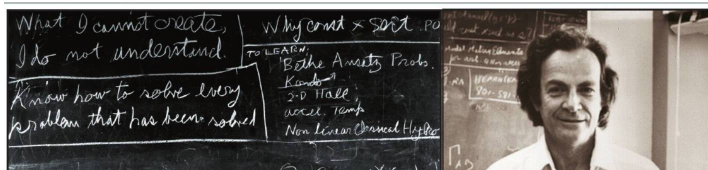
宇宙具有多重历史的思想听起来像是科学幻想，但是它现在被当做科学事实而广被接受。正是理查德·费恩曼提出了这个思想，他不仅是一位伟大的物理学家，也是一位有趣的人物。

我们现在从事的是把爱因斯坦的广义相对论和费恩曼的多重历史的思想合并成一个完备的统一理论，该理论将描述在宇宙中发生的一切事物。如果我们知道宇宙的历史是如何开始的话，这个统一理论就使我们能够计算宇宙将如何发展。但是统一理论自身并不告诉我们宇宙如何开始，或者说初始条件是什么。为此，我们需要所谓的“边界条件”，也就是告诉我们在宇宙的前沿，或者在空间和时间的边缘上发生什么的规则。



如果宇宙的边界只不过是时空的一点，我们便能够不断延展我们的前沿。

如果宇宙的前沿只不过是在空间和时间的正常点上，我们便可以超越过它并宣布更远的领地为宇宙的一部分。另一方面，如果宇宙的边界是处于一个不整齐的边缘，在那里空间和时间被挤皱而且密度无限大，要去定义有意义的边界条件则非常困难。



1988 年费恩曼去世时在加州理工学院的黑板。　　理查德·费因曼。

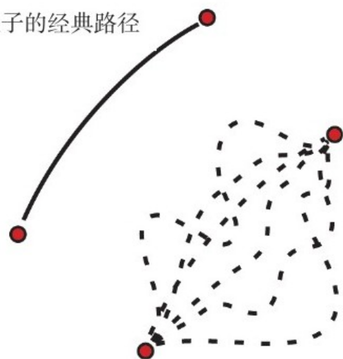
费因曼轶事

1918年，理查德·费恩曼诞生于纽约的布鲁克林。1942年他在普林斯顿大学的约翰·惠勒指导下获得博士学位。之后不久，他被卷入到曼哈顿计划中去。在洛斯阿拉莫斯实验室他喜欢解开最高机密保险柜的密码。他因活跃的性格和恶作剧而著称，而且作为一名罕见的物理学家，他成为原子弹理论的一名关键的贡献者。费恩曼对世界的永恒的好奇心正是他生命的本源。这不仅是他在科学上成功的发动机，还使他取得大量令人惊奇的辉煌成就，例如，玛雅象形文字的破译。

第二次世界大战之后，费恩曼找到研究量子力学的新的有力的方法，因此他被授予1965年的诺贝尔奖。他向基础的经典假设，即每个粒子只有一个特定的历史进行挑战。相反，他提出一个从某位置到另一位置的粒子沿着通过时空的每一可能的路径运动。费恩曼赋予每一轨道以两个数，一个是大小，也就是波幅，另一个是相位，也就是它是否处于波峰或波谷。粒子从A到B的概率是把通过A和B的所有路径的有关的波求和得到。

尽管如此，在日常世界中，我们似乎觉得，物体在出发点和目的地之间只沿着一个单独的路径运动。因为对于大的物体，费恩曼把数赋予每一路径的规则保证除了一个路径外所有路径的贡献在求和时都抵消了，所以日常经验和他的多重历史思想不矛盾。就宏观物体的运动而言，在无数的路径中只有一个是要紧的，这一轨道正是在牛顿经典运动定律中出现的那一个。

然而，我和一位合作者，詹姆·哈特尔意识到，还存在第三种可能性。宇宙在空间和时间中也许没有边界。初看起来，这似乎与彭罗斯和我证明的定理直接抵触。该定理指出，宇宙必须有过一个开端，即时间的边界。然而，正如在第二章中解释过的，存在另一种时间，称作虚时间，那是和我们感觉到正在流逝的通常的实时间成直角的时间。宇宙在实时间中的历史确定其在虚时间中的历史，反之亦然，但是这两种历史可以非常不同。特别是，宇宙在虚时间中可不必有开端或终结。虚时间正如同空间中的另一个方向那样行为。这样，宇宙在虚时间中的历史可被认为是一张曲面，像一个球面，一个平面或者一个马鞍面，只不过是四维而不是二维的（见84页，图3.9）。



在费恩曼的路径积分中粒子可取每一个可能的路径。

如果宇宙的历史像一张马鞍面或一张平面那样伸展开去，人们就遭遇到如何在无限远处选取边界条件的问题。但是，如果宇宙在虚时间中的历史是一张闭合的曲面，正如地球的表面那样，人们便可以在根本上避免边界条件的选取。地球的表面没有边界或边缘。从来没有可靠的报道说，人们从那里失足落下。

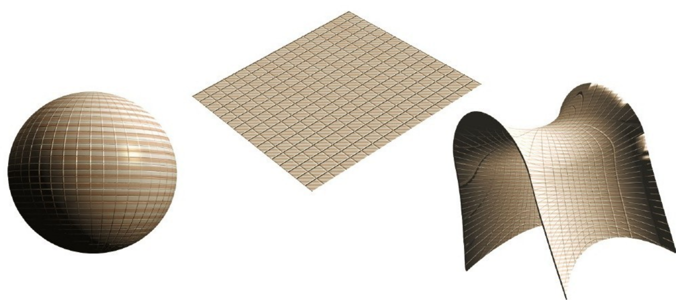


图3.9　宇宙的历史

如果宇宙的历史像一张马鞍面那样向无限远伸展，人们就遇到了在无限远处如何指定边界

条件的问题。如果宇宙在虚时间里的所有历史是像地球表面那样的闭合面，人们就根本不用指定边界条件。

演化定律和初始条件

物理学定律规定一个初始状态如何随时间演化。例如，如果我们向空中抛出一块石头，引力定律将准确地规定石头后续的运动。

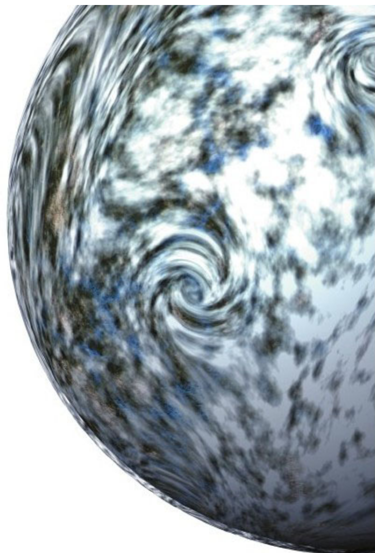
但是，我们光凭这些定律不能预言石头将落在何处。为此，我们还应该知道它离开我们手时的速度和方向。换言之，我们必须知道其初始条件，也就是石头运动的边界条件。

宇宙学企图利用这些物理定律来描述整个宇宙的演化。因此，我们必须诘问宇宙的初始条件应是什么？我们应该对这些初始条件应用这些定律。

初始状态可能对于宇宙的特征有过根本的影响，也许甚至影响到基本粒子和力的性质，而这些对于生命的发展是极其关键的。

一种设想是无边界条件，其设想是说时间和空间是有限的，形成了没有边界的闭合面，正如地球的表面那样，尺度上是有限的，但是没有边界。无边界设想是以费恩曼的多重历史的观念为基础，但是在费恩曼求和中的粒子的历史现在被整个时空所取代，后者代表整个宇宙的历史。无边界条件正是把宇宙的可能历史限制在虚时间中没有边界的那些时空。换言之，宇宙的边界条件是它没有边界。

宇宙学家现在正在研究，无边界设想赞成的初始形态也许还和弱人存原理一道，是否很可能演化成像我们观察到的那样的一个宇宙。



地球的表面没有边界或者边缘。有关人们从地球坠下的报道显然是夸大其词。

如果正如哈特尔和我设想的那样，宇宙在虚时间中的历史的确是一张闭合的曲面，它对于哲学和我们从何而来的图景便有基本的含义。宇宙就会是完全自足的；它不需要外界的任何东西去卷紧其发条并启动之。相反地，宇宙中的任何东西都由科学定律以及宇宙之中的骰子的滚动所确定。这听起来也许有些狂妄，但是它正是我和许多其他科学家所相信的。

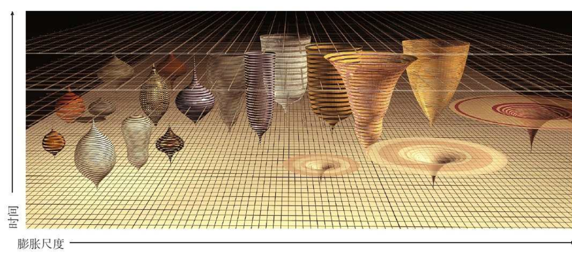






即便宇宙的边界条件是它没有边界，它也不仅仅只有一个单独的历史。它将具有多重历史，正如费恩曼建议的那样。对应于每一种可能的闭曲面在虚时间中都存在一个历史，而在虚时间中的每一个历史都确定其在实时间中的历史。这样，我们对于宇宙就有了过多的可能性。是什么东西从所有可能的宇宙中挑选出我们在其中生存的特殊宇宙呢？我们能注意到的一点是，许多可能的宇宙历史不会经过形成星系和恒星的一系列过程，而这些对于我们自身的发展是至关重要的。而智慧生命在没有星系和恒星的条件下也许可以演化，但这似乎是不太可能的。这样，我们作为能够诘问“宇宙为何是这样子？”的问题的生命存在的事实本身，便是加在我们生活其中的历史上的一个限制。它意味着，我们的历史是具有星系和恒星的少数历史中的一个。这就是所谓的人存原理的一

个例子。人存原理讲，宇宙必须多多少少像我们看到的那样，否则的话，便不会有任何人在此观察它（图3.10）。许多科学家不喜欢人存原理，因为它似乎相当模糊，而且似乎没有多少预言能力。但是可以赋予人存原理以精确的表述，而且看来它在处理宇宙起源之时是关键的。在第二章中描述的M理论允许巨大数量的可能的宇宙历史。这些历史中的大多数不适合智慧生命的发展；它们要么是空虚的，要么太短命，要么太过弯曲，或者在其他某些方面出差错。而根据理查德·费恩曼的多重历史观念，这些不可居住的历史可有相当高的概率（见84页）。



3.10

插图最左面是那些向自身坍缩成为闭合的宇宙（a）。在最右面是那些将永远继续膨胀的开放的宇宙（b）。

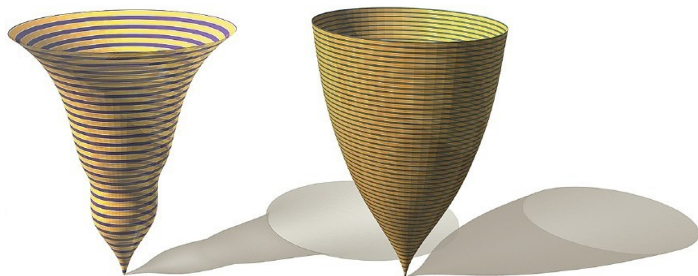
那些在向自身落回和继续像（c1）或者像（c2）双暴胀那样膨胀之间平衡的临界宇宙可以怀有智慧生命。我们自己的宇宙（d）现在正准备着继续膨胀。

人存原理

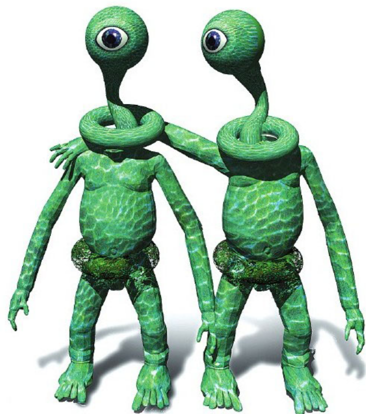
粗略地讲，人存原理是说，我们看到的宇宙是这种样子，至少在部分上是因为我们的存在。从整体外观上看，那刚好和完全可预见的统一理论的梦想正相反。在统一理论中自然定律是完备的，而世界之所以这样子，是因为它不可能是别的样子。人存原理具有多种不同版本，从弱到无聊的，到那些强到荒谬的程度。虽然大多数科学家对人存原理的强的版本持怀疑态度，很少人会对某些弱人存的论证的效用有异议。

弱人存原理归结成解释我们能够在宇宙的哪些不同时期或者部分中栖居。例如，为何大爆炸发生于大约一百亿年以前的原因是，宇宙必须足够古老，使某些恒星已经完成它们的演化以产生像氧和碳那样的元素，我们就是由它们构成的，而宇宙也必须足够年轻，使得某些恒星仍然在提供能量以维持生命。

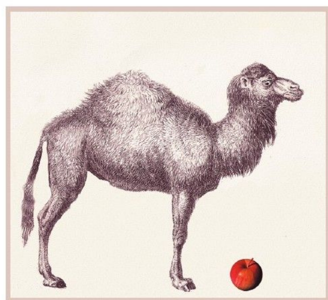
在无边界设想的框架内，人们可以利用费恩曼的规则，把数赋予宇宙的每个历史，去发现宇宙的那个性质很可能发生。在这种情形下，因为要求历史包含有智慧生命，所以必须贯彻人存原理。当然，如果人们能证明宇宙的一些不同的初始形态很可能已演化产生像我们今天观察到的一个宇宙，人们将会对人存原理更加欢欣鼓舞。这就意味着我们栖居的宇宙部分的初始状态不必被很仔细地挑选过。



双暴胀可以怀有智慧生命　　　　我们自己的宇宙现在继续膨胀



事实上，可以存在多少不包含智慧生命的历史根本没有什么关系。我们只对智慧生命在其中发展的历史的子集感兴趣。这种智慧生命可以一点都不像人类。小绿色外星人也可以。事实上，他们也许更优秀。人类的智慧行为的记录并不非常光彩。



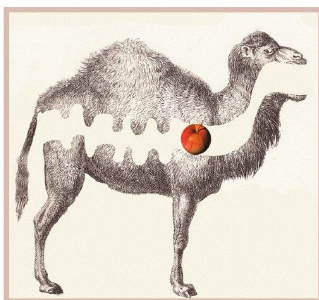




图3.11

从远处看，饮料茎管就像一根一维的线。

作为人存原理威力的一个例子，考虑空间中的方向的数目。我们生存在三维空间中，这是一个常识。那也就是说，我们可以有三个数字代表空间中的一点的位置，例如纬度、经度和海拔高度。但是为何空间是三维的呢？为什么不像科学幻想中的那样为二维的，或者四维的，或者甚至是其他维的呢？在M理论中，空间有九维或者十维，但是人们认为其中6个或7个方向被卷曲成非常小，只留下三个大的几乎平坦的方向（图3.11）。

为何我们不生活在八维被卷曲得很小只留下二维可让我们觉察到的历史中呢？一只二维动物要消化食物非常困难。如果它有一根穿透自身的肠子，它就把动物分离成两部分，而这可怜的生灵就一分为二了。这样，两个平坦的方向对于任何像智慧生命这样复杂的东西是不够的。另一方面，如果存在4个或者更多个的几乎平坦的方向，那么两个物体之间的万有引力在它们互相靠近时就增加得更快。这就意味着行星们没有围绕其太阳公转的稳定轨道。它们要么会落到太阳中去（见89页，图3.12A），要么逃逸到黑暗和寒冷的太空去（图3.12B）。

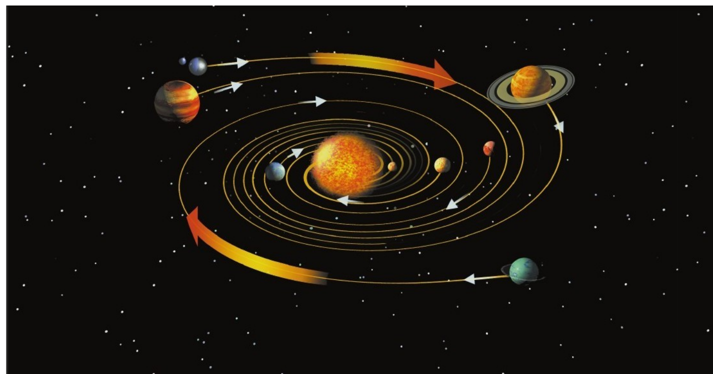


图3.12A

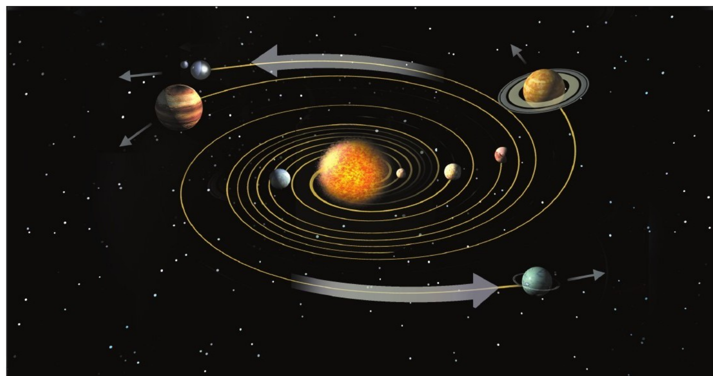


图3.12B

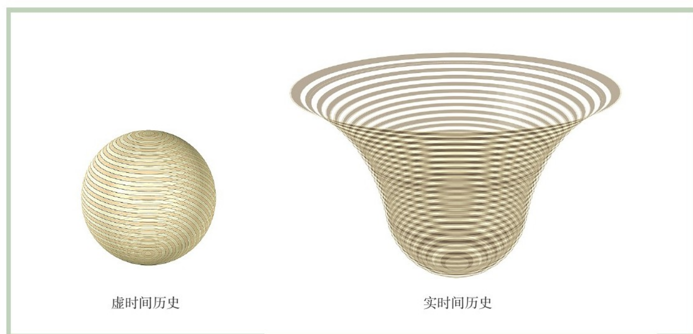


图3.13

最简单的虚时间无边界历史是一个球面。

这确定在实时间中的历史以暴胀的形式膨胀。

类似地，原子中的电子的轨道也不稳定，因此我们所知的物体便不存在。这样，尽管多重历史的思想允许任何数目的几乎平坦的方向，只有具有三个平坦方向的历史才包含智慧生命。也只有在这种历史中才会提出这样的诘问：“为何空间具有三维？”

宇宙在虚时间中的最简单的历史是一个圆球面，正如地球的表面那样，只是多了两维（图3.13）。它确定了宇宙在我们所经历的实时间中的历史，在这个历史中宇宙在空间的每一点上都相同，而在时间中膨胀。它在这些方面和我们生活其间的宇宙很相像。但是其膨胀率非常快速而且它不断地越变越快。这种加速膨胀被称为暴胀，因为它就像价格以一直上升的速率增长的方式。



图3.14

一般而言，价格的暴胀被认为是糟糕的事，但是在宇宙的情形下，暴胀是非常有益的。其巨大的膨胀将早期宇宙中也许存在的坑坑洼洼全部抹平。随着宇宙膨胀，它从引力场借得能量去创造更多的物质。正的物质能量刚好和负的引力能量相互平衡，这样使总能量为零。随着宇宙的尺度加倍，物质和引力能都加倍——这样，零的两倍仍为零。如果银行业这么简单该多好（图3.14）！

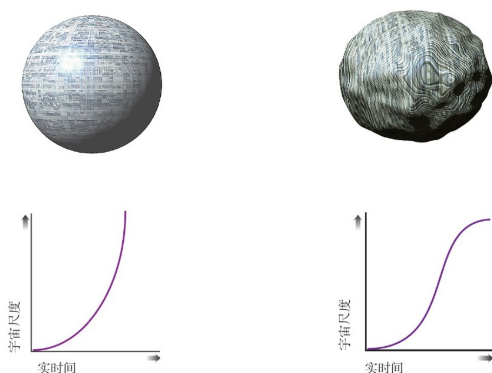


图3.15

暴胀宇宙

在热大爆炸模型中，在早期宇宙中热量来不及从一个区域流到另一个区域去。尽管如此，无论我们观测任何方向，微波背景辐射的温度总是一样的。这意味着，宇宙的初始状态在任何地方都应具有完全相同的温度。

为了寻找一个其中许多不同的初始状态都已演化成某种像现代宇宙的模型，人们提出早期宇宙也许经历了一个非常快速膨胀的时期。这个膨胀被称作暴胀，这意味着它以不断增加的速率，而不像我们今天观察的那样以减小的速率膨胀。这种暴胀相，可解释为何宇宙在每一个方向都显得相同，因为在早期宇宙中光有足够的时间从一个区域传播到另一个区域。

永远以暴胀方式连续膨胀的宇宙其虚时间中的对应历史是一个完美的球面。但是在我们自己的宇宙中，在短于一秒钟之后暴胀膨胀就缓慢下来，而星系得以形成。这意味着我们的宇宙在虚时间中的历史是一个在南极略微平坦的球面。



批发价指数——通货膨胀和超级通货膨胀

1914 年 7 月	1.0
1919 年 1 月	2.6
1919 年 7 月	3.4
1920 年 1 月	12.6
1921 年 1 月	14.4
1921 年 7 月	14.3
1922 年 1 月	36.7
1922 年 7 月	100.6
1923 年 1 月	2 785.0
1923 年 7 月	194 000.0
1923 年 11 月	726 000 000 000.0

图3.16　暴胀也许是自然定律

德国的通货膨胀在议和之后直到1920年2月一直上升，当时价格水平相当于1918年的5倍。

在1922年7月之后超暴胀相开始。在15个月里人们对钱币的信心完全被摧毁，价格指数越来越快地上升，甚至超过了印刷纸币的速度，制造纸币赶不上贬值的速度。到了1923年后期，300个纸厂开足马力，而且150个印刷公司的2000个印刷厂日以继夜地制造钱币。

如果宇宙在虚时间中的历史是个完美的圆球面，那么在实时间中的相应的历史就会是继续以暴胀方式永远膨胀的宇宙。当宇宙在暴胀时，物质不会落到一起形成星系和恒星，而且生命，更不用说像我们这样的智慧生命不能发展。这样，尽管多重历史思想允许在虚时间中完美圆球面的宇宙历史，它们不是特别有趣。然而，在虚时间中球面南极处略微平坦些的历史和我们更加相关（图3.15）。

在这种情况下，在实时间中的相应的历史首先以加速暴胀的方式膨胀。但是这种膨胀接着开始缓慢下来，而且星系能够形成。为了让智慧生命得以发展，南极处变平的程度必须是极其微小的。这将意味着宇宙将首先膨胀一个巨大的倍数。两次世界大战之间德国的通货膨胀创造了记录，价格上升了几十亿倍，但是在宇宙中发生的暴胀至少是这个记录的一千亿亿亿倍（图3.16）。

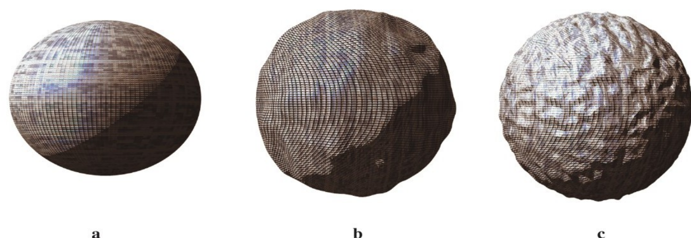


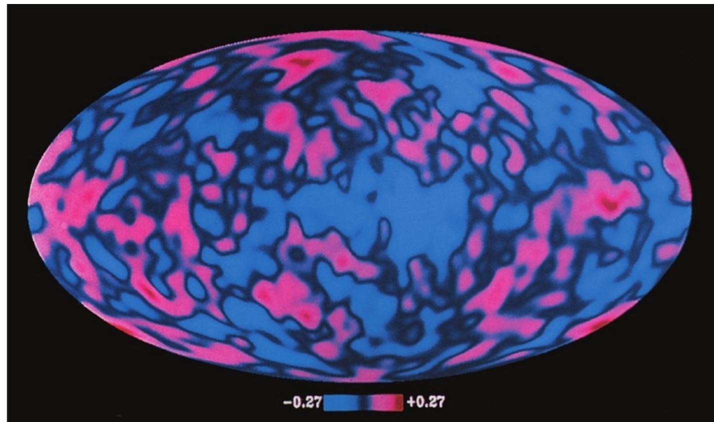
图3.17

很可能的和不太可能的历史

像（a）那样的光滑历史是最可能的，但是它们只有很少数。

尽管稍微不规则的历史（b）和（c）每一种都较不可能，但是它们这么大量地存在，使得宇宙的历史很可能稍微有些不光滑。

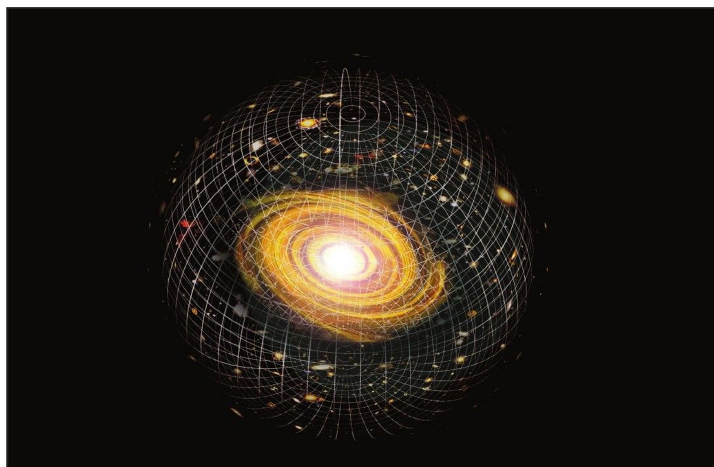
由于不确定性原理，包含智慧生命的宇宙不仅只有一个历史。相反地，在虚时间中的历史将为一整族稍微变形的球面。每一个对应于在实时间中宇宙长时期但非无限久暴胀的历史。然后我们可以问这些允许的历史中的哪一个是最可能的。结果发现最可能的历史不是完全光滑的，而是具有微小起伏的（图3.17）。在最可能历史中的涟漪实在是非常微小的。它和光滑的偏离只有十万分之一的数量级。尽管它们极其微小，我们已经设法观察到它们。这正是从太空不同方向到达我们这儿的微波的细小变化。宇宙背景探险者在1989年发射并且画出了天空的微波图。



COBE卫星DMR仪器绘制的全天空图，它显示时间皱纹的证据。

不同颜色表示不同温度。但是从红到蓝的整体范围仅仅大约为一度的万分之一。然而，这种早期宇宙中不同区域之间的变化，在更密集的区域产生额外的引力吸引，足以阻止它们永久膨胀下去，而使它们在自身的引力下重新坍缩，从而形成星系和恒星。这样，至少在原则上，COBE图是宇宙中的所有结构的蓝图。

和智慧生命的出现相容的宇宙的最可能历史在未来将如何行为呢？依宇宙中的物质的量而定，似乎存在不同的可能性。如果物质密度超过某一临界值，则星系之间的引力吸引就会使它们之间的分离减缓下来，而且最终阻止它们相互飞离。然后它们将开始相互下落，并在一次大挤压中全部撞到一起。大挤压是在实时间中宇宙历史的终结（见96页，图3.18）。


图3.18

宇宙可能的一种终结是大挤压，所有物质将被吸回到它的巨大的灾难性的引力陷阱中去。

如果宇宙密度低于临界值，则引力太弱，不足以阻止星系永远相互飞离。所有恒星都燃烧殆尽，而宇宙将变得越来越空虚，越来越寒冷。这样，事情又要完结，但是以一种不那么戏剧性的方式。不管是哪种方式，宇宙将再继续生存好几十亿年（图3.19）。

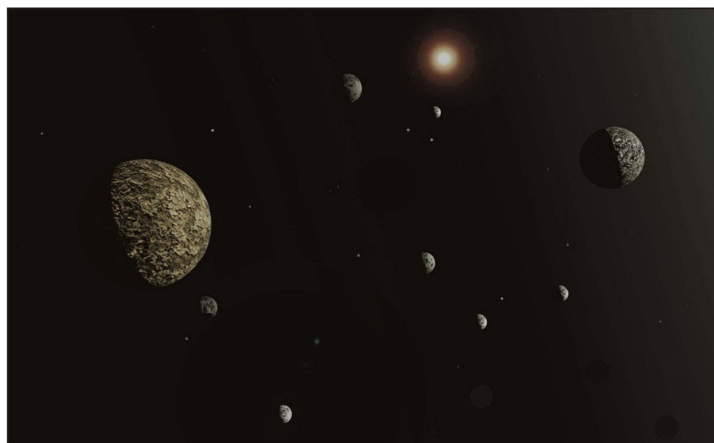


图3.19

久远的寒冷的沉寂，万物消失，最后的恒星耗尽燃料而熄灭。

宇宙中除了物质，还可以包含所谓“真空能量”的东西，这种能量甚至存在于表观空虚的空间之中。按照爱因斯坦著名的方程，这种真空能量具有质量，这意味着它对宇宙膨胀具有引力效应。但是，非常引人注意的是，真空能量的效应和物质效应相反。物质使膨胀缓慢下来，并最终能使之停止而且反转。另一方面，真空能量使膨胀加速，正如暴胀那样。事实上，真空能量恰恰像在第一章中提到的宇宙常数那样行为。那是爱因斯坦在1917年意识到，他的原来的方程不能允许一个代表静态宇宙的解时，加到方程上去的。在哈勃发现了宇宙膨胀之后，将这一项加到方程上的动机即不复存在，而爱因斯坦将宇宙常数当做一项错误而拒绝。

宇宙常数

是我的

最大的

错误吗？

阿尔伯特·爱因斯坦

然而，这也许原先根本就不是错误。正如在第二章中描述的，我们现在意识到，量子理论意味着时空充满了量子涨落。在一种超对称的理论中，这些基态起伏的无限大的正的和负的能量，在不同自旋的粒子之间刚好对消。但是，因为宇宙不处于一种超对称态，所以我们不会指望正的和负的能量被完全对消，甚至连小的有限的真空能量都不遗留下来。仅有的令人惊讶的是，真空能量这么接近于零，这一点在不久前还没有这么显明。这也许是人存原理的另一个例子。具有更大的真空能量的历史不会形成星系，也就不包含能够询问这个问题的生物："为何真空能量这么低？"

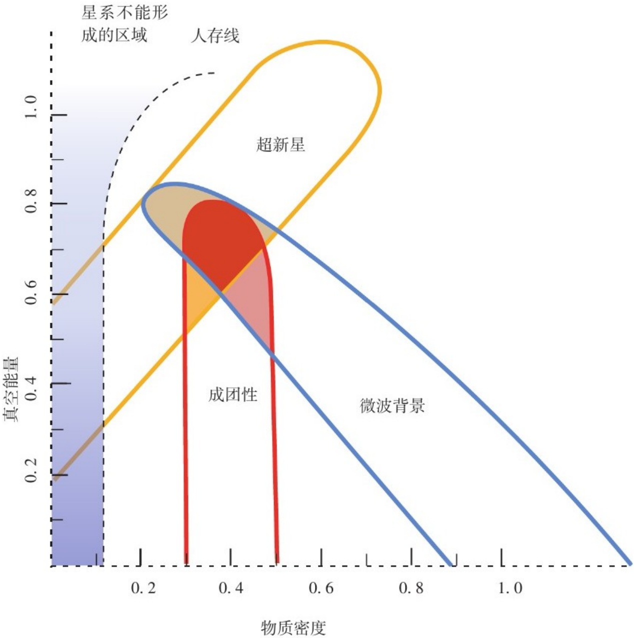


图3.20

结合远处超新星，宇宙微波背景辐射和宇宙中物质分布的观察可以相当好地估算宇宙中的真空能量和物质密度。

我们从各种观测可以试图确定宇宙中物质和真空的能量。我们可用一张图来标明此结果，水平方面表示物质密度而垂直方向表示真空能

量。点线显示智慧生命能够发展的区域边缘（图3.20）。

在这张图上分别标出对应于超新星、物质成团和微波背景的观测的区域。幸运的是，这三个区域有一个共同的交集。如果物质密度和真空能量处于这个交集，它意味着宇宙膨胀在长期变缓慢之后已开始重新加速。看来暴胀可能是自然的一个定律。

即便把我关在果壳之中熏
仍然自以为无限空间之王。

——莎士比亚《哈姆雷特》第二幕第二场



我们在这一章中已经看到，如何按照浩渺宇宙在虚时间中的历史来理解它的行为。这个在虚时间中的历史是个细小的略微平坦的球面。它酷似哈姆雷特的果壳，然而在实时间中发生的一切都作为密码被储存在这个果壳上面。这样，哈姆雷特是完全正确的。我们也许是被束缚在果壳之中，而仍然自以为无限空间之王。

第四章
预言未来

黑洞中的信息丧失如何降低我们预言未来的能力。





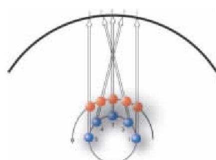


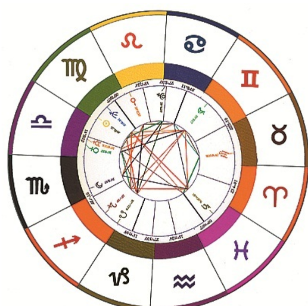
图4.1

一位在围绕着太阳公转的地球（蓝色）上的观察者在星座背景下观看火星（红色）。

行星在天空中的复杂表观运动可由牛顿定律解释，而毫不影响个人的命运。

人类总想控制未来，或者至少要预言将来发生什么。这就是为何占星术如此流行的原因。占星术宣称地球上的事件和行星划过天穹的运动相关联。如果占星家们胆敢冒险并作出可被检验的确定的预言的话，这便是或者将会是科学上可以检验的假设。然而，他们识相得很，所做的

预告都是这么模糊，使得对任何结果都能左右逢源。诸如“个人关系可能紧张”或者“你将有一个高报酬的机会”等等断言永远不会被证伪。



“火星于本月进入人马座，对于你而言是寻求自身知识的时候。火星要求你以自以为正确的而非他人以为正确的方式生活。而这将会发生。

土星于20日到达你的太阳图中与义务和事业相关的区域，而你将会学习负责任和处理困难的关系。

然而，你在满月之时将会对改变你的整个生活有一个美妙的洞察和概观。”

但是科学家不信占星术的真正原因不是因为科学证据或者毋宁说缺乏科学证据，而是它和已被实验检验的其他理论不协调。在哥白尼和伽利略发现行星围绕太阳而非地球公转，而且牛顿发现制约它们运动的定律后，占星术变成极其难以置信。为什么从地球上看到其他行星相对于天空背景的位置和较小行星上的自称为智慧生命的巨分子有任何关联呢（图4.1）？而这正是占星学要让我们相信的。在本书描述的某些理论并不比占星术拥有更多的实验证据，但是因为这些理论和迄今经受住检验的理论相协调，所以我们相信它们。

牛顿定律和其他物理理论的成功导致科学宿命论的观念。它是在19世纪初由法国科学家拉普拉斯侯爵首次表述的。拉普拉斯建议，如果我们知道在某一时刻宇宙中所有粒子的位置和速度，则物理定律应允许我们预言宇宙在过去或将来的任何时刻的状态（图4.2）。

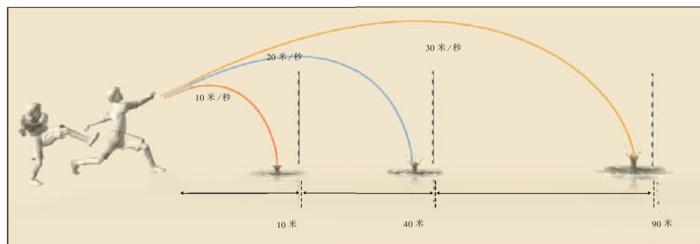


图4.2

如果你知道棒球在何处以什么速度抛出，你便能预言它会落到何处。

换言之，如果科学宿命论成立，我们在原则上便能够预言将来，而不必借助于占星术。当然在实际上甚至简单得像牛顿引力论那样的东西也会导出对于多于二个粒子的情形都不能得到准确解的方程。况且，方程经常具有所谓混沌的性质，这样在某一时刻位置或速度的微小变化会导致在将来完全不同的行为。《侏罗纪公园》的观众都知道，在一处很小的扰动会在另一处引起巨变。一只蝴蝶在东京鼓翼会在纽约中央公园引起大雨（图4.3）。麻烦在于，事件的序列是不可重复的。蝴蝶下一回鼓翼时，一大堆其他因素将会不同并且也影响天气。这就是天气预告这么不可靠的原因。



图4.3

这样，虽然在原则上，量子电动力学定律应该允许我们去计算化学和生物学中的一切，我们在从数学方程预言人类行为方面并没有长足进步。尽管这些现实的困难，大多数科学家仍然自我安慰，认为在原则上，将来是可以预言的。

初看起来，宿命论似乎还受到了不确定性原理的威胁。不确定性原理讲，我们不能在同一时刻准确地测量一个粒子的位置和速度。我们把位置测量得越准确，就把速度确定得越不准确，反之亦然。而拉普拉斯的科学宿命论坚持，如果我们知道在某一瞬间的粒子位置和速度，就能确定其在过去或者将来任何时刻的位置和速度。但是，如果不确定性原理阻止我们同时准确知悉一个时刻的位置和速度，我们甚至无从开始。

无论我们有多么好的计算机，如果我们输入糟糕的数据，我们将得到糟糕的预言。



然而，在一种合并了不确定性原理的称作量子力学的新理论中，宿命论以一种修正的方式得到恢复。粗略地讲，人们在量子力学中可以精确地预言在经典的拉普拉斯观点中所期望的一半。一个粒子在量子力学中不具有很好定义的位置或速度，但是它的状态可由所谓的波函数代表（图4.4）。

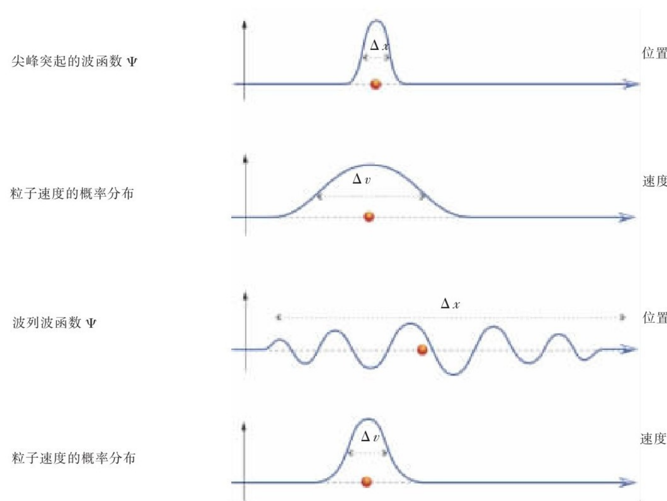


图4.4

波函数确定粒子具有不同位置和速度的概率，而Δx和Δv服从不确定性原理。

波函数是在空间的每一点上的一个数，它给出在那个位置上找到该

粒子的概率。波函数从一点到另一点的变化率告诉我们粒子不同速度的概率。有些波函数在空间的特定点有尖锐的高峰。在这些情形下，粒子在位置上只有小量的不确定性。但是我们在图上还能看到，在这种情形下，波函数在这点邻近变化得很快速，一边上升一边下降。这意味着速度的概率在很大的范围散开，换句话说，就是速度的不确定性很大。另一方面，考虑一列连续的波。现在在位置上存在大的不确定性，但是在速度上存在小的不确定性。这样，由波函数描述的粒子不具有很好定义的位置或速度。它满足不确定性原理。现在我们意识到波函数就是我们能够很好定义的一切。我们甚至不能设想粒子具有上帝知晓的位置和速度，而我们是被蒙蔽了。这种“隐变量”理论预言的结果和观察不相符。甚至上帝也受不确定性原理的限制，而不能知悉位置和速度；祂只能知道波函数。

图4.5

薛定谔方程

波函数Ψ在时间中的演化由哈密顿算符H确定，后者和被考虑的物理系统的能量相关。

波函数随时间的变化率由所谓的薛定谔方程给出（图4.5）。如果我们知道某一时刻的波函数，我们就能利用薛定谔方程去计算在过去或将来任一时刻的波函数。因此，在量子理论中仍然存在宿命论，但它是处

于一种减缩的形式。取代同时预言位置和速度的能力，我们只能预言波函数。这就允许我们准确地预言位置，或者预言速度，但是二者不能得兼。这样，在量子理论中进行准确预言的能力只是在经典的拉普拉斯世界观中的一半。尽管如此，在这种限制的意义上讲，人们仍然可以宣称存在宿命论。



图4.6

在狭义相对论的平坦时空中以不同的速度运动的观察者具有不同的时间测量，但是我们可以在其中的任何一个时间中应用薛定谔方程去预言将来的波函数是什么样的。

然而，利用薛定谔方程在时间前进的方向去演化波函数（也就是去预言未来会发生什么）隐含地假定时间在所有地方永远光滑地流逝。在牛顿物理学中这肯定是正确的。时间被假定为绝对的，这意味着在宇宙的历史中的每一事件都被一个称作时间的数标志着，而且时间标志的系列从无限的过去圆滑地连续到无限的将来。这也许可被称作常识时间观，而且这还是大部分人甚至大部分物理学家下意识的时间观。然而，正如我们看到的，绝对时间的概念在1905年被狭义相对论所抛弃。在狭义相对论中时间不再是自身独立的量，而只不过是称作时空的四维连续统中的一个方向。在狭义相对论中，不同的观察者以不同的速度在不同的途径穿越时空。每一位观察者沿着他或她遵循的途径具有自己的时间测度，并且不同的观察者在事件之间测量到的时间间隔是不同的（图4.6）。

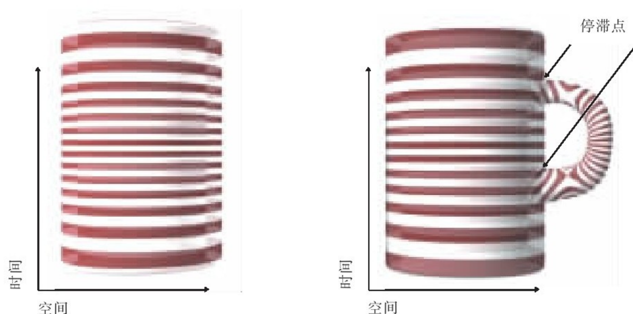


图4.7　时间停止不前

时间测量在手把接到主圆柱之处必须有停滞点：也就是时间停止不前之处。时间在这些点上向任何方向都不增加。因此，人们不能应用薛定谔方程去预言将来的波函数是什么样的。

这样，在狭义相对论中不存在我们可用以给事件加标签的惟一绝对的时间。然而，狭义相对论的时空是平坦的。这意味着在狭义相对论中，由任何自由运动观察者测量的时间在时空中从负无穷至正无穷光滑地流逝。我们可以使用其中的任一时间测度于薛定谔方程中去演化波函数。因此，在狭义相对论中我们仍然拥有宿命论的量子版本。

在广义相对论中情形便不同了。这里时空不是平坦的，而是弯曲的，并且它被其中的物质和能量所变形。时空的曲率在我们的太阳系中是如此之微小，至少在宏观的尺度上，它和我们通常的时间观念不冲突。在这种情形下，我们在薛定谔方程中仍然可用这种时间去得到波函数的决定性的演化。然而，我们一旦允许时空弯曲，则另外的可能性就会出现，即时空具有一种不允许对于每一观察者都光滑增长的时间结构，这一点正是我们对于合理的时间测量所期望的性质。例如，假设时空像一个垂直的圆柱面（图4.7）。

圆柱面的垂直往上方向是时间测度，对于每位观察者它从负无穷流逝到正无穷。然而，取而代之我们将时空想象成一个带把手（或“虫洞”）的圆柱面，这个把手从主圆柱面分叉开来又合并回去。那么任何时间测量都在把手和主圆柱面接合处有一停滞点：这就是时间静止之点。对于任何观察者而言，时间在这些点不流逝。在这样的时空中，我们不能用薛定谔方程去得到波函数的决定性的演化。谨防虫洞：你永远不知道从它们那儿会冒出什么来。

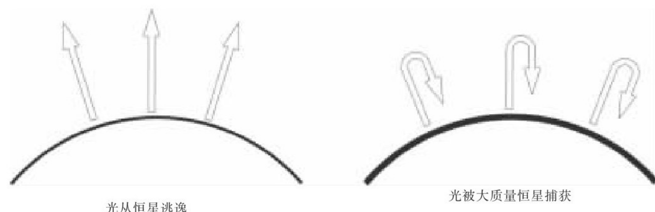


图4.9


图4.8

黑洞是我们认为时间对任何观察者并非总是增加的原因。1783年人们首次讨论黑洞。一位剑桥的学监，约翰·米歇尔进行了如下的论证。如果有人垂直向上射出一个粒子，譬如炮弹，它的上升将被引力所减缓，而且这个粒子最终将停止上升并返回落下（图4.8）。然而，如果初始往上的速度超过称作逃逸速度的临界值，引力将永远不够强大到足以停止该粒子，而它将飞离远去。对于地球而言逃逸速度大约为每秒12公里，对于太阳则大约为每秒100公里。这两个速度都比真正的炮弹速度高出许多，但是它们和光速相比就显得很可怜，后者是每秒300 000公里。这样，光可以从地球或者太阳轻而易举地逃逸。然而，米歇尔论断，可以存在比太阳更大质量的恒星，其逃逸速度超过光速（图4.9）。因为任何发出的光都被这些恒星的引力拖曳回去，所以我们就不能看到它们。这样，它们就是米歇尔叫做暗星而我们现在叫做黑洞的东西。

施瓦兹席尔德黑洞

1916年德国天文学家卡尔·施瓦兹席尔德找到爱因斯坦相对论的一个解，它代表一个球形黑洞。施瓦兹席尔德揭示了广义相对论的一个令人吃惊的含义。他指出，如果恒星质量被集中在足够小的区域，恒星表面的引力场就会变得这么强，甚至光都不能逃逸。这就是现在我们称为黑洞的东西，它是时空中以所谓的事件视界为界的区域。任何东西，甚至光都不可能从黑洞到达远处的观察者。

在很长的时间里，大多数物理学家，包括爱因斯坦都很怀疑，物体的这么极端的形态在实际的宇宙中是否真正发生过。然而，现在我们理解，任何足够重的非旋转的恒星，不管它的形状和内部结构多么复杂，当它耗尽了核燃料，将必然坍缩成完美的球形的施瓦兹席尔德黑洞。黑洞的事件视界的半径（R）只依赖于它的质量；它由下式给出

$$R = \frac{2GM}{c^2}$$

在这个公式中（c）是光速，（G）是牛顿常数，而（M）是黑洞质量。例如，和太阳等质量的黑洞，其半径只有两英里。

米歇尔暗星的思想是基于牛顿物理学。牛顿理论中的时间是绝对的，不管发生任何事件它都正常流逝。这样，在经典的牛顿图像中它们不影响我们预言将来的能力。但是，在广义相对论中情形就非常不同，大质量物体使时空弯曲。



1916年，即广义相对论被提出之后不久，卡尔·施瓦兹席尔德（他在第一次世界大战时得病不久死于俄国前线）找到广义相对论中场方程的代表一个黑洞的解。在很多年里施瓦兹席尔德找到的东西没有得到理解或者重视。爱因斯坦本人从不相信黑洞，而且大多数广义相对论的元老认同他的态度。我还记得有一次去巴黎作学术报告，那是关于我发现的量子理论意味着黑洞不是完全黑的。我的学术报告彻底失败，因为那时

候在巴黎几乎无人相信黑洞。法国人还觉得这个名字，如他们所翻译的，trou noir具有可疑的性暗示，应该代之以astre occlu或“隐星”。然而，无论是这个还是其他提议的名字都无法像黑洞这个术语那样能抓住公众的想象力。这是美国物理学家约翰·阿契巴尔德·惠勒首先引进的，他激发了这个领域中的大量的现代研究。

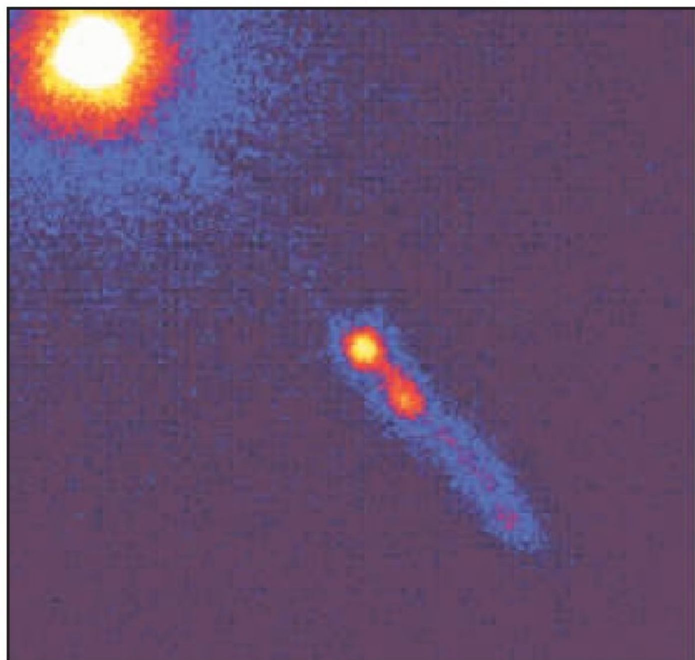


图4.10

类星体3C273，第一个被发现的类恒星无线电源，在一个小区域内产生了大量的功率。物质落入黑洞似乎是能够解释这么高亮度的惟一的机制。

约翰·惠勒

约翰·阿契巴尔德·惠勒于1911年出生于佛罗里达的杰克逊维尔。1933年他得到约翰·霍普金斯大学博士，他的论文是关于氦原子对光的散射。1938年他和丹麦物理学家尼尔斯·玻尔合作发展核裂变理论。之后，惠勒和他的研究生里查德·费因曼有一阵专心研究电动力学；但是在美国参与第二次世界大战之后不久，他们一道为曼哈顿规划效力。

惠勒在1950年代早期，由于受罗伯特·奥本海默在1939年的大质量恒星引力坍缩工作的启发，把注意力转向爱因斯坦的广义相对论。那时候大多数物理学家都忙于研究核物理，而广义相对论被认为与物理世界不相干。但是，惠勒既通过他的研究，又通过他在普林斯顿首次开相对论课程，几乎一手改变了这个领域。

多年之后，他于1969年为物体的坍缩状态杜撰了黑洞这个术语，那时很少人相信它是实际的。他受威纳·伊斯雷尔工作的启发，猜想黑洞没有毛，这意味着任

何非旋转的大质量恒星的坍缩状态事实上应由施瓦兹席尔德解来描述。

1963年类星体的发现引起有关黑洞的理论研究以及检测它们的观察尝试的迸发（图4.10）。这里就是已经呈现的图景。考虑我们所相信的具有20倍太阳质量的恒星的历史。这类恒星是由诸如猎户座星云中的那些气体云形成的（图4.11）。当气体云在自身的引力下收缩时，气体被加热上去，并且最终热到足以开始热聚变反应，把氢转化成氦。这个步骤产生的热量制造了压力，使恒星对抗住自身的引力，并且阻止它进一步收缩。一个恒星可以在这种状态停留很长时期，燃烧氢并将光辐射到太空中去。

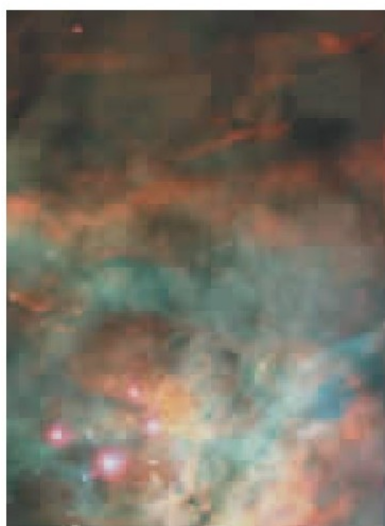


图4.11

恒星在像猎户星云那样的气体和尘埃云中形成。

恒星引力场影响从它出发的光线的途径。人们可以画一张图，往上方向表示时间，水平方向代表离开恒星中心的距离（见11页，图4.12）。在这张图上，恒星的表面由两根垂直线代表，在中心的两边各有一根。时间的单位可选为秒，而距离单位选择光秒——也就光在一秒钟内旅行的距离。当我们使用这些单位时，光速为1，也就是光速为每秒一光秒。这意味着远离恒星及其引力场，图上的光线的轨迹是一根和垂直方向成45°角的直线。然而，邻近恒星处，由恒星质量产生的时空曲率改变了光线的轨迹，使它们和垂直方向夹更小的角。

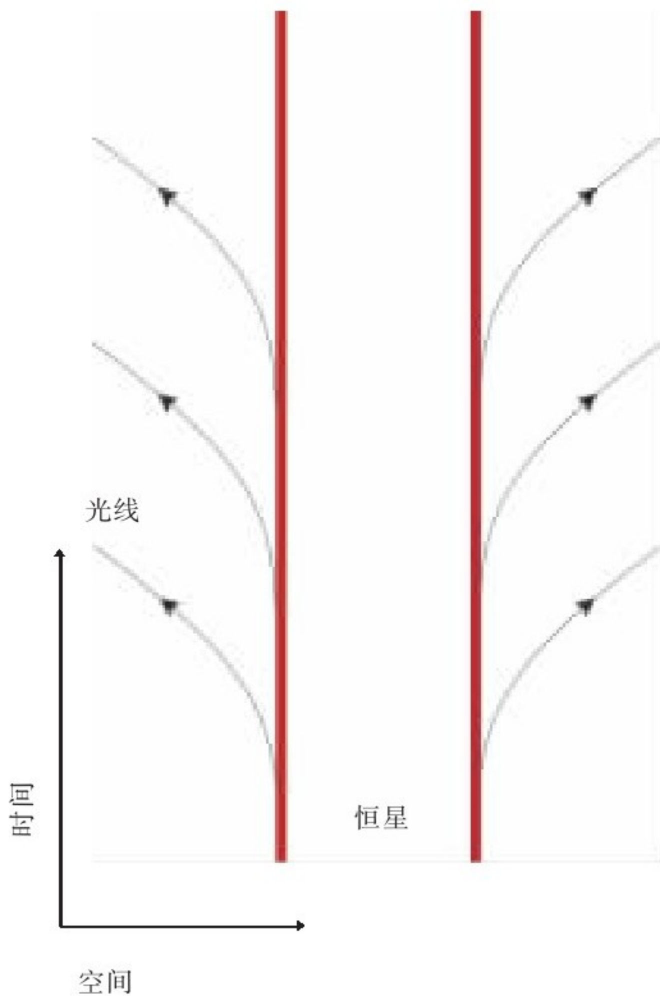


图4.12

非坍缩恒星周围的时空。光线可以从恒星表面（垂直的红线）逃逸。光线在远离恒星时和垂直方向成45°角，但是在恒星附近，由于恒星质量引起的时空翘曲使光线和垂直方向成更小的角度。

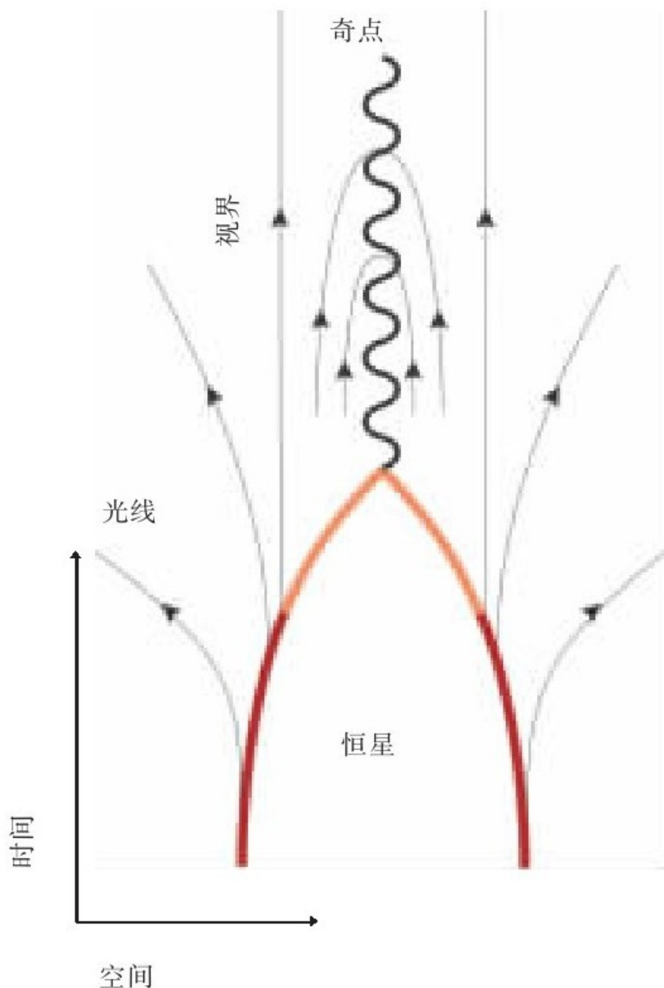
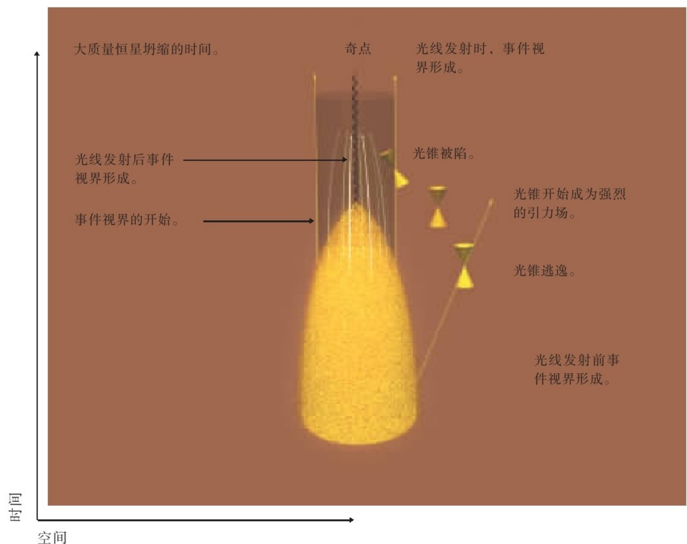


图4.13

如果恒星坍缩（红线在一点相遇）时空被翘曲得这么厉害，使邻近表面的光线向内运动。一个黑洞形成，这是从那里光都不能逃逸的时空的一个区域。

大质量恒星将比太阳更快速得多地把它们的氢燃烧成氦。这意味着它们可以在短到几亿年的时间内把氢耗尽。此后，这类恒星面临着危机。它们能把氦燃烧成诸如碳和氧等等更重的元素，但是这些核反应不会释放出大量能量，这样恒星失去支持自身对抗引力的热量和热压力。因此它们开始变得更小。如果它们质量比大约太阳质量的两倍还大，其压力将永远不足以停住收缩。它们将坍缩成零尺度和无限密度，从而形成所谓的奇点（图4.13）。在这张时间对离开中心距离的图上，随着恒星缩小，从它表面出发的光线轨迹会在起始时和垂直线夹越来越小的角度。当恒星达到一定的临界半径，其轨迹就变成图上的垂线，这意味着

光线将在离恒星常距离处逗留，永远不能离开。光线的临界轨迹掠过的表面称作事件视界，它把时空中的光线能够逃逸的区域和不能逃逸的区域隔开来。在恒星通过其事件视界后，从它表面发射的光线将被时空曲率向里面弯折。恒星就成为一个米歇尔的暗星，或者用我们现在的话讲，就是黑洞。



上图：视界，也就是黑洞的外边界是由不能从黑洞逃逸，而只能停止在离中心常数距离处徘徊的光线组成。

如果光线不能从黑洞跑出，你何以检测它呢？其答案是黑洞正如坍缩之前的物体那样，仍然把同样的引力拉力施加在周围的对象上。如果太阳是一个黑洞而且在转变成黑洞之前没有损失任何质量，则行星将仍然像现在这样围绕着它公转。

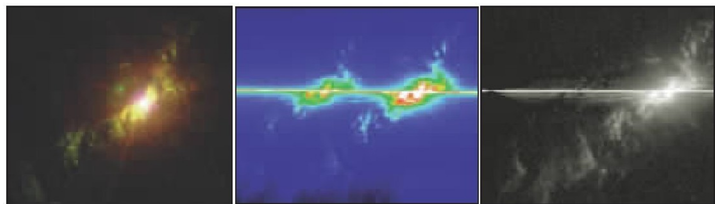


图4.14

一个星系中心的黑洞

左上图：广场行星照相机拍摄的星系NGC4151。

中心图：穿过图像的水平线是由在4151中心的黑洞产生的光引起的。

右上图：显示氧发射的速度的像。所有证据表明NGC4151包含有一个大约一亿倍太阳质量的黑洞。

因此搜索黑洞的一种方法是寻找围绕着似乎是看不见的紧致的大质量物体公转的物体。若干这样的系统已被观测到。发生在星系和类星体中心的巨大黑洞也许是最令人印象深刻的（图4.14）。

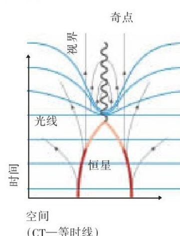
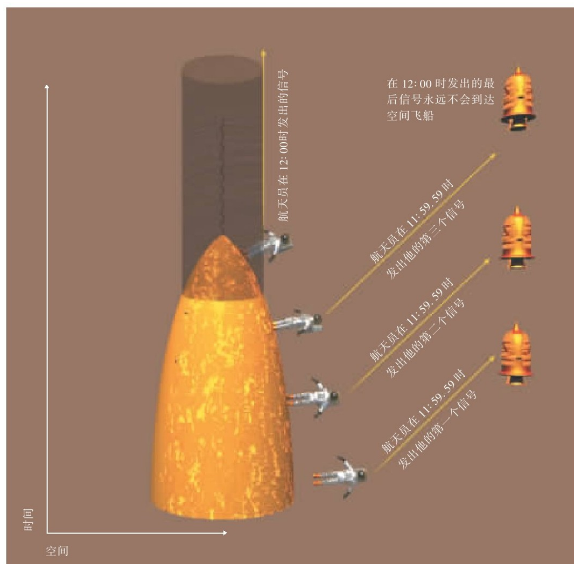


图4.15

迄此讨论到的黑洞的性质还未触犯宿命论。一位落进黑洞并撞到奇点上去的航天员的时间将会终结。然而，在广义相对论中，人们可以在不同的地方随意地以不同的速率来测量时间。因此，人们可以在航天员接近奇点时加快他或她的手表，使之仍然记下无限的时间间隔。在时间距离图上，这个新时间的常数值的表面将会在中心拥挤在一起，刚好在奇性出现的点的下头。但是它们在远离黑洞的几乎平坦的时空中和通常的时间测度相一致（图4.15）。

人们可以在薛定谔方程中使用这个时间，如果他知道初始的波函数，便能计算后来的波函数。这样，人们仍然有宿命论。然而，值得注意的是，在后期波函数的一部分处于黑洞之内，它不能被外界的人观察到。这样，一位明智地不落入黑洞的观察者不能往过去方向演化薛定谔方程并且计算出早先时刻的波函数。为了做到这一点，他或她就需要知道黑洞之内的那一部分波函数。这包含有落进黑洞的物体的信息。因为一个给定质量和旋转速度的黑洞可由非常大量的不同的粒子集合形成，所以这可能是非常大量的信息。一个黑洞与坍缩形成它的物体的性质无关。约翰·惠勒把这个结果称为“黑洞无毛”。对于法国人而言，这正好证实了他们的猜疑。



上图显示一名航天员于11：59.57时在一颗正在坍缩的恒星上着陆，伴随着恒星收缩到临界半径以下。临界半径的引力强到信号都不能逃逸出来。他以规则的间隔从他的手表向围绕该恒量公转的空间飞船发送信号。

在远处观察该恒星的某人将永远看不到它穿越事件视界并且进入黑洞。相反地，该恒星仿佛停留在临界半径的紧外头，在恒星表面上的钟似乎缓慢下来并且停止。



无发结果。

黑洞温度

一个黑洞犹如一个具有温度（T）的热体一样发射辐射，其温度只与它的质量有关。更精确地讲，此温度由下式给出：

$$T = \frac{\hbar c^2}{8\pi kGM}$$

在此公式中符号（c）是光速，（$\hbar$）是普郎克

常数，（G）是牛顿引力常数，而（k）是玻尔兹曼常数。

最后，（M）代表黑洞质量，这样黑洞越小，其温度越高。这个公式告诉我们，几个太阳质量的一个黑洞，其温度大约只比绝对零度高一百万分之一度。

当我发现了黑洞不是完全黑的时候，和宿命论的冲突就产生了。正如我们在第二章中看到的，量子理论意味着，甚至在所谓的真空中场也不能够精确地为零。如果它们为零，则它们不但有精确的值即位置为零，而且有精确的变化率即速度亦为零。这就违反了不确定性原理。该原理讲，不能同时很好地定义位置和速度。相反地，所有的场必须具有一定量的所谓的真空起伏（和在第二章中的单摆必须具有零点起伏的方式一样）。真空起伏可以几种似乎不同的方式解释，但是这几种方式事实上在数学中是等效的。从实证主义观点，人们可以随意选取任何对该问题最有用的图像。在这种情形下，使用下述的图像来理解真空起伏是非常有助的。在时空的某处同时出现的虚粒子对相互分离，再回到一块而且相互湮灭。“虚的”表明这些粒子不能被直接观测到，但是它们的间接效应能被测量到，而且它们和理论预言相符合的精度令人印象深刻（图4.16）。

如果黑洞在场的话，则粒子对中的一个成员可以落入黑洞，留下另一个成员自由地逃往无穷远处（图4.17）。从远离黑洞的某人的观点看，逃逸粒子就显得是被黑洞辐射出来。黑洞的谱刚好是我们从一个热体所预料到的谱，其温度和视界——黑洞的边界上的引力场成正比。换言之，黑洞的温度依赖于它的大小。

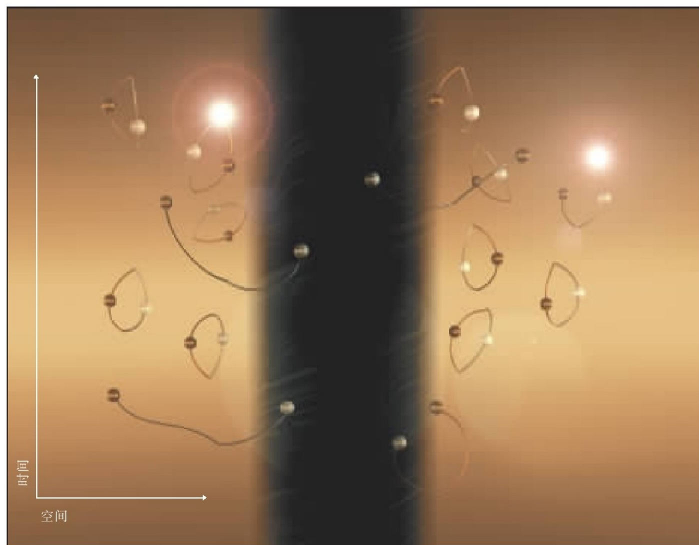


图4.17

在黑洞的事件视界邻近，虚粒子出现并相互湮灭。

粒子对中的一员落入黑洞，而它的伴侣自由逃逸。从事件视界外面看，黑洞正把逃逸的粒子发射出来。

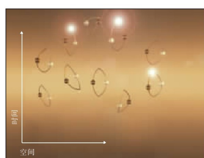


图4.16

在空虚的空间中，粒子对出现，引起简短的存在，然而再相互湮灭。

一个具有几倍太阳质量的黑洞的温度大约为百万分之一度的绝对温度，而一个更大的黑洞之温度甚至更低。这样，从这类黑洞出来的任何量子辐射完全被淹没在热大爆炸遗留下的2.7度的辐射，也就是我们在第二章中讨论过的宇宙背景辐射之中。人们也许可能检测到从小很多即热很多的黑洞来的辐射，但是似乎它们在附近也不很多。这是一个遗憾。如果有一个被发现，我就要得到诺贝尔奖。然而，我们拥有这种辐射的间接观测证据，它来自于早期宇宙。正如在第三章中描述的，人们认为宇宙的极早期历史经历了一个暴胀时期。宇宙在这一时期以不断增加的速率膨胀。这个时期的膨胀如此之快速，以至于有些物体离开我们太远，连它们的光线都从未抵达我们这里；在光线向我们传来时，宇宙已

膨胀得太多太快了。这样，在宇宙中存在一个视界，正如黑洞的视界那样，把以光线能抵达我们的区域和不能抵达的区域分隔开来（图4.18）。

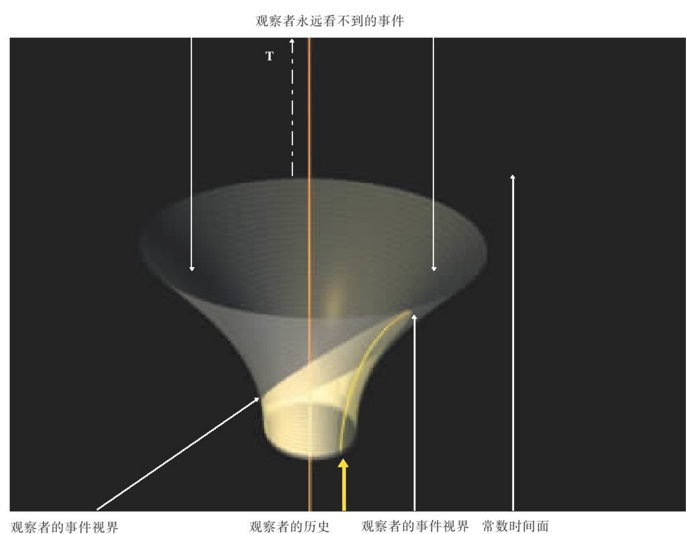


图4.18

广义相对论场方程的德·西特解代表一个以暴胀方式膨胀的宇宙。在此图中时间用向上的方向，而宇宙的尺度用水平方向表示。空间距离增大得这么快，使远处星系来的光永远不能到达我们这里，从而存在一个事件视界。正如在黑洞中那样，这是我们不能观察到的区域的边界。

非常类似的论证表明，如同存在从黑洞视界来的辐射那样，也应该存在从这个视界来的热辐射。我们已经知道如何在热辐射中预期密度起伏的特征谱。在这种情形下，这些密度起伏会随着宇宙而膨胀。当它们的长度尺度超出事件视界的尺度时，它们就被凝固了，这样它们作为从早期宇宙残存下来的宇宙背景辐射的温度中的小变化，今天可以被我们观察到。这些变化的观测和热起伏的预言相互一致的程度令人印象深刻。

尽管黑洞辐射的观测证据有些间接，所以研究过这一问题的人都一致认为，为了和我们其他观测上检验过的理论相一致，它必然发生。这对于宿命论具有重要的含义。从黑洞来的辐射将带走能量，这表明黑洞将失去质量而变得更小。接下去，这意味着它的温度会上升，而且辐射率将增加。黑洞最终将到达零质量。我们不知如何计算在这一点所要发生的，但是仅有的自然而又合理的结果似乎应是黑洞完全消失。那么，波函数在黑洞里的部分以及它挟持的有关落入黑洞物体的信息的下场如

何呢？第一种猜测是，当黑洞最后消失时，这一部分波函数，以及它携带的信息将会涌现。然而，携带信息不能不消费，正如人们收到电话账单时意识到的那样。



信息需要能量去负载它，而在黑洞的最后阶段只有很小的能量留下。内部信息逃逸的仅有的似乎可行的方式是，它连续地伴随着辐射出现，而不必等待到最后阶段。然而，根据虚粒子对的一个成员落进，而另一成员逃离的图像，人们预料逃离粒子与落入粒子不相关，或者前者不携带走有关后者的信息。这样，仅有的答案似乎是，在黑洞内的波函数中的信息丢失了（图4.19）。

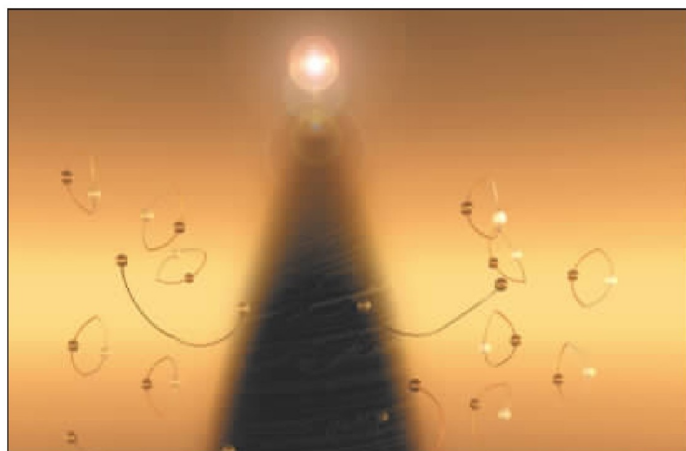


图4.19

从黑洞视界出来的热辐射带走了正能量，因此减小了黑洞质量。随着它损失质量，黑洞的温度升高而且辐射率增大，这样它的质量损失得越来越快。我们不知道当质量变成极小时会发生什么，但是最可能的结果似乎是黑洞会完全消失。

这种信息丧失对于宿命论具有重要的含义。让我们从头开始，我们注意到，即便你知道黑洞消失后的波函数，你也不能把薛定谔方程演化回去并且计算在黑洞形成之前的波函数。它是什么样子会部分地依赖于在黑洞中丢失的那一点波函数。我们习惯地以为，我们可以准确地知道

过去。然而，如果信息在黑洞中丧失，情况就并非如此。任何事情都可能已经发生过。

然而，一般说来，人们诸如占星家和他们的那些咨询者对预言将来比回溯过去更感兴趣。初看起来，似乎落到黑洞中的波函数部分的丧失不应妨碍我们预言黑洞外的波函数。但是，结果是这一丧失的确干扰了这一预言，正如我们在考虑爱因斯坦、玻里斯·帕多尔斯基和纳珍·罗森在1930年代提出的一个理想实验时能够看到的。



图4.20

在爱因斯坦-帕多尔斯基-罗森理想实验中，观察者测量了一个粒子自旋，就将知道第二个粒子自旋的方向。

想象一个放射性原子衰变并在相反方面发出两个具有相反自旋的粒子。一位只看到其中一个粒子的观察者不能预言该粒子是往右还是往左自旋。但是如果观察者测量到它往右自旋，那么他或她就能确定地预言另一个粒子往左自旋，反之亦然（图4.20）。爱因斯坦认为这证明了量子理论是荒谬的：另一个粒子现在也许在星系的另一边，而人们会立即知道它自旋的方向。然而，其他大多数科学家都同意，不是量子理论，而是爱因斯坦弄混淆了。爱因斯坦-帕多尔斯基-罗森理想实验并不表明人们能比光更快地发送信息。

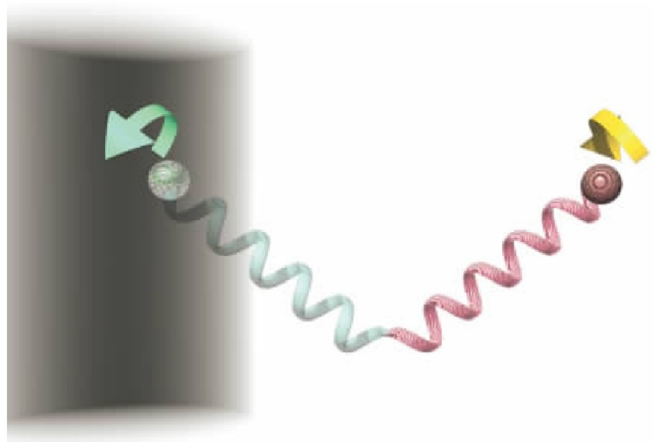


图4.21

虚粒子对具有一个波函数，这个波函数预言两个粒子具有相反自旋。但是如果一个粒子落入黑洞，便不可能确定地预言余下粒子的自旋。

那正是荒谬的部分。人们不能选择其自己的粒子将被测量为向右自旋，这样人们不能指定远方观察者的粒子应向左自旋。

事实上，这个理想实验正好是黑洞辐射所发生的。虚粒子对有一波函数，它预言这两个成员肯定具有相反的自旋（图4.21）。我们想做的是预言飞离粒子的自旋和波函数，如果我们能够观察到落入的粒子，我们便能做到这一点。但是那个粒子现在处于黑洞之内，不能测量得到它的自旋和波函数。正因为这样，人们无法预言逃逸粒子的自旋和波函数。它可具有不同的自旋和不同的波函数，其概率是各式各样的，但是它不能具有惟一的自旋和波函数。这样看来，我们预言将来的能力被进一步削减了。拉普拉斯的经典思想，即人们能同时预言粒子的位置和速度，因为不确定性原理指出人们不能同时准确地测量位置和速度，必须被修正。然而，人们仍然能准确测量波函数并且利用薛定谔方程去预言未来应发生的事。这就允许人们确定地预言位置和速度的结合物——这是人们根据拉普拉斯思想所能预言的一半。我们能够确定地预言粒子具有相反的自旋。但是如果一个粒子落进黑洞，那么我们就不能对余下的粒子作确定的预言。这意味着在黑洞外不能确定预言任何测量：我们作出确定预言的能力被减低至零。这样，也许就预言将来而言，占星家和科学定律是半斤八两。

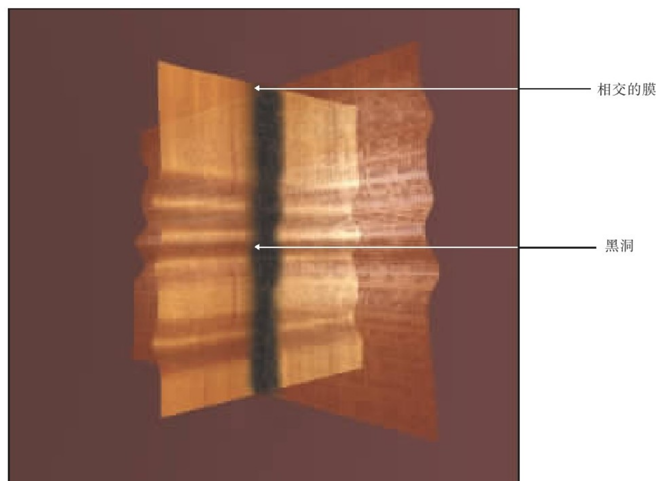


图4.22

黑洞可被认为在时空的额外维中的p-膜的相交。有关黑洞内部状态的信息作为波被储存在p-膜上。

许多物理学家不喜欢这种宿命论的降低，因而建议可以某种方式从黑洞之内将信息取出。多少年来人们相信可以找到保存这信息的某种方法，可惜这仅仅是一种虔诚的希望而已。但在1996年安德鲁·斯特罗明格和库姆朗·瓦法获得重大进展。他们采取把黑洞考虑成由许多称为p-膜的建筑构件组成。

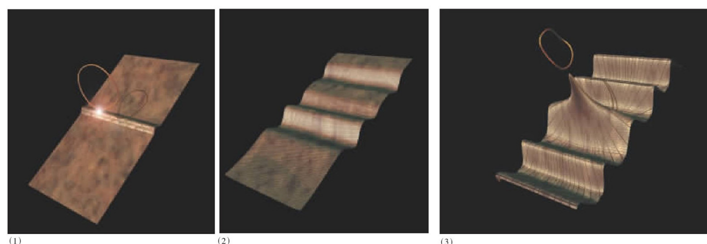


图4.23

一个落入黑洞的粒子可被认为是打到一个p-膜上的一个闭合圈环（1）。它会在p-膜上激起波（2）。波会相撞并且会使p-膜的一部分变成一个闭合的弦而断裂开去（3）。这就是黑洞发射出的一个粒子。

回想一下，可以把p-膜认为是一张通过三维空间以及我们没注意到的额外七维的运动的薄片（见125页，图4.22）。在某些情形下，人们可以证明在p-膜上的波的数目和人们预料的黑洞所包含的信息量相同。如果粒子打到p-膜上，它们便会在膜上激起额外的波。类似地，如果在p-膜上不同方向的波在某点相遇，它们会产生一个如此大的尖峰，使得

p-膜的一小片破裂开去，而作为粒子离开。这样，p-膜正如黑洞一样，能吸收和发射粒子（图4.23）。



人们可以将p-膜当作有效理论；也就是说，我们不需要相信实际上存在在平坦时空中运动的薄片，黑洞可以似乎像它们是由这种薄片组成的那样行为。这正如水，它是由亿亿个具有复杂的相互作用的H2O分子构成。但是光滑的液体是非常好的有效模型。由p-膜构成黑洞的数学模型给出的结果和早先描述的虚粒子对图像很相似。这样，从实证主义的观点看，至少对于一定种类的黑洞，它是一个同样好的模型。对于这些种类，p-膜模型和虚粒子对模型对发射率的预言完全一样。然而，这里存在一个重要差别：在p-膜模型中，关于落入黑洞物体的信息将被储存在p-膜上的波的波函数中。p-膜被认为是平坦时空中的薄片。因为这个原因，时间会平滑地向前流逝，光线的轨迹不会被弯折，而且波里的信息不会丧失。相反地，信息最终在来自p-膜来的辐射中从黑洞涌现。这样，根据p-膜模型，我们可以利用薛定谔方程去计算将来的波函数。没有任何东西丧失，而时间将光滑地推移。在量子的意义上我们具有完整的宿命论。



那么其中哪种图像是正确的呢？部分波函数是否在黑洞中丢失了，或者正如p-膜模型建议的，所有信息再次跑出来？这是当代理论物理的一个突出的问题。许多人相信，新近的研究表明信息没有丧失。世界是安全和可预言的，而且不会发生任何意外事件。但是这不清楚。如果人们认真地对待爱因斯坦的广义相对论，人们必须允许时空自身打结，而信息在折缝中丧失的可能性。当星际航船探险号穿越一个虫洞，发生了一些意料之外的事。因为我正搭乘该船，并和牛顿、爱因斯坦和达他玩扑克，所以我知道此事。我大吃一惊。只要看看我的膝盖上出现了什么。



《星际航行》的一个镜头。

第五章
护卫过去

时间旅行可能吗？

一种先进的文明能回返以前并改变过去吗？



Whereas Stephen W. Hawking (having lost a previous bet on this subject by not demanding genericity) still firmly believes that naked singularities are an anathema and should be prohibited by the laws of classical physics,

And whereas John Preskill and Kip Thorne (having won the previous bet) still regard naked singularities as quantum gravitational objects that might exist, unclothed by horizons, for all the Universe to see,

Therefore Hawking offers, and Preskill/Thorne accept, a wager that

> *When any form of classical matter or field that is incapable of becoming singular in flat spacetime is coupled to general relativity via the classical Einstein equations, then*

A dynamical evolution from generic initial conditions *(i.e., from an open set of initial data)* **can never produce a naked singularity** *(a past-incomplete null geodesic from* $\mathcal{I}_+$*)*.

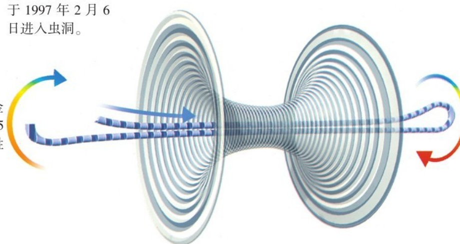
The loser will reward the winner with clothing to cover the winner's nakedness. The clothing is to be embroidered with a suitable, truly concessionary message.

John P. Preskill Kip S. Thorne

Stephen W. Hawking **John P. Preskill & Kip S. Thorne**

Pasadena, California, 5 February 1997

(1) 史蒂芬·霍金于 1997 年 2 月 6 日进入虫洞。



(3) 史蒂芬·霍金于 1997 年 2 月 5 日签下他确信胜算的赌状。

(2)人们在将来证明，从一般初始条件起始，动力学演化永远不可能产生裸奇异性。



基帕·索恩

我的朋友兼合作者基帕·索恩和我打过许多赌（见左图）。他不是一位人云亦云的物理学家。这种品格使他具有勇气成为讨论时间旅行的实际可行性的第一位严肃科学家。

在公开场合思考时间旅行是很为难的。他要么面临反对把公款浪费在这么荒谬的规划上的声浪，要么被要求把这研究归于军事用途。无论如何，怎么保护我们自己免受拥有时间机器的人的攻击呢？他们也许能改变历史并且统治世界。我们之中只有很少的几个人鲁莽地研究这种在物理学圈子里政治上不明智的题目。我们利用专业术语描述时间旅行来做掩饰。

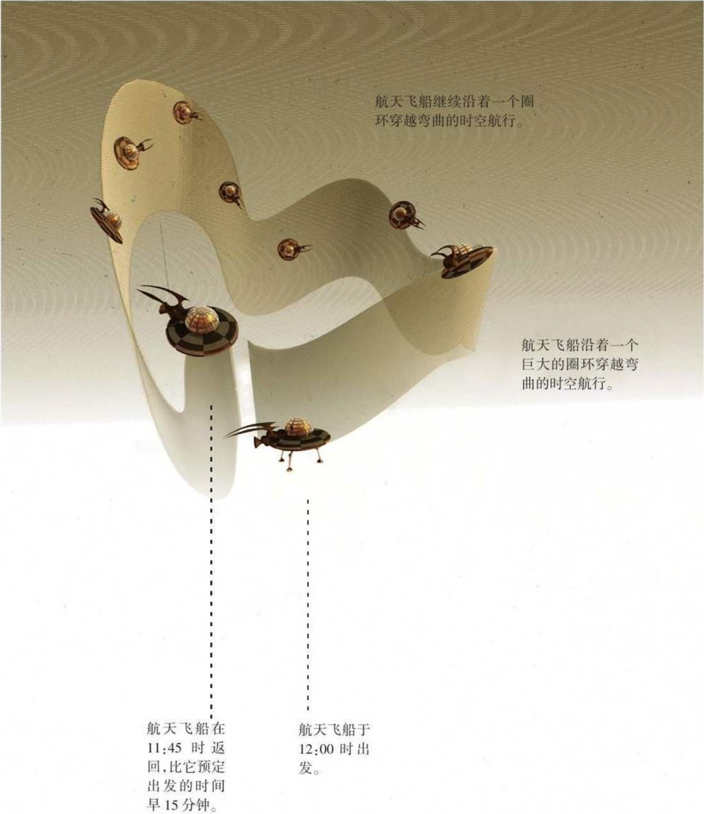
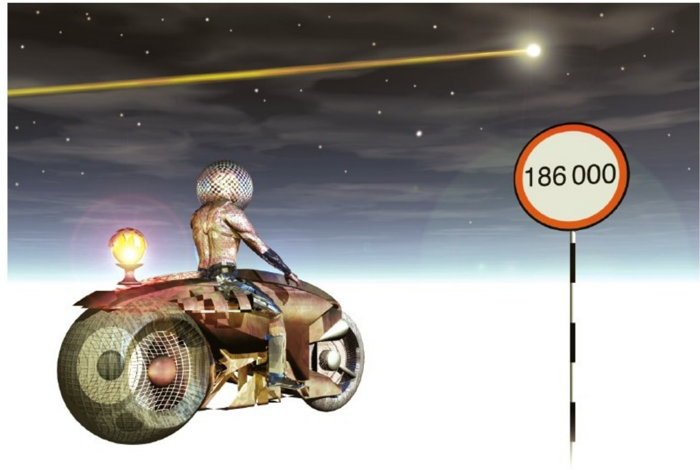


图5.1



爱因斯坦的广义相对论是所有现代有关时间旅行讨论的基础。正如我们在早先章节中讲到的，爱因斯坦方程描述宇宙中的物质和能量如何

将空间和时间弯曲和变形，从而使空间和时间变成动力量。在广义相对论中某人由其手表测量的私人时间总是增加，这正像在牛顿理论或者狭义相对论的平坦时空中一样。但是现在有了可能性：时空能够弯曲得这么厉害，使你在乘航天飞船出发之前即已返回（图5.1）。



如果存在虫洞，也就是在第四章中提到的连接空间和时间的不同区域的时空管道，它就成为可能发生此事的一个方式。其思想是，你驾驶你的航天飞船进入虫洞的一个口，而在不同地方和不同时间处的另一个口出来（图5.2，见136页）。

虫洞，如果它们存在的话，将会是空间中解决速度极限问题的办法：正如相对论要求的，航天飞船必须以低于光速的速度行进，这样要穿越星系就需要几万年。但是你可以在一餐饭的工夫通过虫洞到达星系的另一边并且返回。然而，人们能够证明，如果虫洞存在，你还可以利用它们在你出发之前即已返回。这样，你也许以为能做一些事，譬如首先炸毁发射台上的火箭，以阻止你出发。这是祖父佯谬的变种：如果你回到过去在你父亲被怀胎之前将你祖父杀死，将会发生什么？（图5.3，见138页）

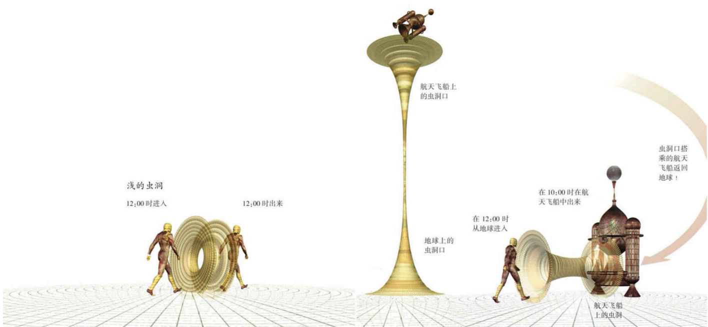


图5.2　孪生子佯谬的第二变种

（1）如果存在一个两边出口很靠近的虫洞，你就可以穿过该虫洞而且在同一时刻从虫洞出来。

（2）人们可以想象让虫洞的一个口搭乘航天飞船进行长途旅行，而让虫洞的另一个口留在地球上。

（3）因为孪生子佯谬效应，当航天飞船返回时，它所包含的虫洞口流逝的时间比留在地球上的口流逝的时间少。这意味着，如果你迈进地球上的口，你就能够在更早的时刻从航天飞船出来。

当然，只有你相信当你回到时间的过去时，你具有自由意志为所欲为，这才成为佯谬。本书不进行自由意志的哲学讨论。取而代之，它只集中讨论物理定律是否允许时空被卷曲得如此之甚，使得诸如航天飞船的宏观物体能回到自己的过去。根据爱因斯坦理论，航天飞船必须以低于光的局部速度行进，并沿着所谓的类时轨迹通过时空。这样，人们可以用专业术语来表述这个问题：时空是否允许封闭的类时曲线——也就是说，它会一次又一次地返回其出发点吗？我将把这类路径称为“时间圈环”。



图5.3

一颗通过虫洞进入更早时间的点燃子弹能够影响其射手吗？

宇宙弦

宇宙弦是长的具有微小截面的重的物体，它们可能在宇宙的早期阶段产生。宇宙弦一旦形成，它们就会因宇宙的膨胀而进一步伸展，而且一根单独的宇宙弦在现时刻可以横贯我们观察到的整个宇宙。

当代粒子理论暗示宇宙弦的发生。该理论预言，在宇宙的热的早期阶段，物质处于对称相，和液态水非常相像——是对称的：在每一点每一方向上都相同，而不像冰晶体

那样，具有分立的结构。

当宇宙冷却下来，早期相的对称在相距遥远的区域会以不同的方式受到破坏。结果，宇宙物质在那些区域中就停留在不同的基态上。宇宙弦便是在这些区域之间的边界上的物质的形态。由于不同区域不可能具有相同的基态，因此它们的形成是不可避免的。

我们可以试图在三个水平上回答这个问题。首先是爱因斯坦的广义相对论，它假定宇宙具有定义很好的没有任何不确定性的历史。我们对这一经典的理论有相当完整的图象。然而，正如我们已经看到的，因为我们观察到物质遭受不确定性和量子涨落的制约，这个理论不能是完全正确的。

因此我们能够在第二水平，也就是在半经典理论上探索有关时间旅行的问题。在这个水平上，我们按照量子理论来考虑物质的行为，它具有不确定性和量子涨落，但是时空是明确定义的经典的。这里的图象不甚完整，但是我们至少有了如何进展的一些概念。



图5.4

时空允许闭合的类时曲线，使之一而再再而三地返回其出发点吗？

> 哥德尔的不完备性定理
>
> 1931年数学家库尔特·哥德尔证明了他的著名的有关数学本性的不完备性定理。该定理陈述，在任何公理化形式系统，譬如现代数学中，总有在定义该系统的公理的基础上既不能证明也不能证伪的问题。换言之，哥德尔证明了，存在用任何一族规则或者步骤不能解决的问题。
>
> 哥德尔定理对数学立下了基本的极限。它极大地震动了科学界，因为它抛弃了被广泛接受的信念，即数学是一个基于单一逻辑基础的协调而完备的系统。在自然中还存在决定性的但却变成混沌的演化，人们在实际上无法跟随这种演化。哥德尔定理、海森伯的不确定性原理以及混沌性，形成科学知识的局限性的核心，这类局限性只是在20世纪才被意识到。

最后，存在完整的量子引力论，而不管其最终是什么样子的。在此理论中，不仅物质而且时间和空间自身都是不确定的而且起伏涨落，甚至连如何去提出时间旅行是否可能的问题都不清楚。也许我们充其量能做到的只是询问，在几乎经典的并摆脱了不确定性的时空区域的人们会如何解释他们的测量。他们会认为在强引力和大量子涨落的区域中发生过时间旅行吗？

从经典理论开始：狭义相对论（没有引力的相对论）不允许时间旅行，早先知道的弯曲的时空也不行。所以当1949年发现哥德尔定理（见框中文字）的库尔特·哥德尔发现了一个时空时，爱因斯坦大吃一惊。这个时空是充满了旋转的物质，通过每一点都有时间圈环的宇宙（图5.4）。

哥德尔解需要一个宇宙常数，自然中是否存在宇宙常数仍不清楚，但是接着找到了其他无需宇宙常数的解。特别有趣的一个解是两根宇宙弦相互快速穿越的时空。

宇宙弦不应该和弦理论中的弦相混淆，虽然它们并非完全无关。它们是具有长度并只有微小截面的物体。在某些基本粒子的理论中预言它们会发生。一根单独宇宙弦外面的时空是平坦的。然而，这是切割去了

一个楔子的平坦时空，弦处于楔子的锋刃端点。它像是一个圆锥：取来一大张圆纸，切去一块尖角刚好在圆心的像一块糕点的楔形，再将余下部分的两个切缘粘在一起，这样你就得到一个圆锥。这代表了宇宙弦存在的时空（图5.5）。

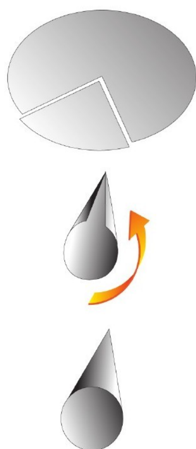


图5.5

请注意，因为圆锥的表面是你开始使用的同样的平坦纸张（切去楔形），除了尖顶外，你仍然可以称它是“平坦的”。围绕有尖顶的一个圆周长比以同样距离围绕原先的圆纸中心的圆周长更短，换言之，因为失去一块，所以围绕尖顶的圆周比平坦空间中的同半径的圆周更短。这个事实表明，圆锥尖顶有曲率（图5.6）。

类似地，在宇宙弦的情形下，从平直时空取走楔形缩短了围绕弦的圆周，但并不影响时间或者沿着弦的距离。这意味着围绕着一根单独的弦的时空不包含任何时间圈环，所以不可能旅行到过去。然而，如果还存在第二根相对于第一根运动的弦，其时间方向将是第一根弦的时间和空间方向的组合。这表明，从和第一根弦一道运动的人看来，由于第二根弦被切走的楔形缩短了空间距离和时间间隔（图5.7）。如果两根宇宙弦以接近光速作相对运动，则围绕着两根弦运动的时间可被节省得这么厉害，使得一个人还未出发即已到达。换言之，存在时间圈环使人们可以旅行到过去。

宇宙弦时空包含有正能量密度的物质，这是和我们知道的物理学相一致的。然而，这种产生时间圈环的卷曲一直延伸到空间的无限处，并且回到时间的无限过去。这样，这些时空是和在它们中的时间旅行一道

被创生的。我们没有理由相信我们自己的宇宙是以这种卷曲的方式创生的，而且我们没有来自将来的访客的可靠证据[我不太相信所谓的阴谋理论，说幽浮（UFO）来自于未来，政府知悉这一切并包庇之，政府经常泄漏秘密]。因此，我假定在遥远的过去，更准确地讲，在我称为S的通过时空的某个面的过去不存在时间圈环。这个问题就变成：某种先进的文明能建造时间机器吗？也就是说，能不能把S未来的时空（在图中处于S面之上）修正，使时间圈环出现在有限的区域内？我说有限区域是因为不管该文明变得多么先进，它大抵也只能控制宇宙的有限部分。

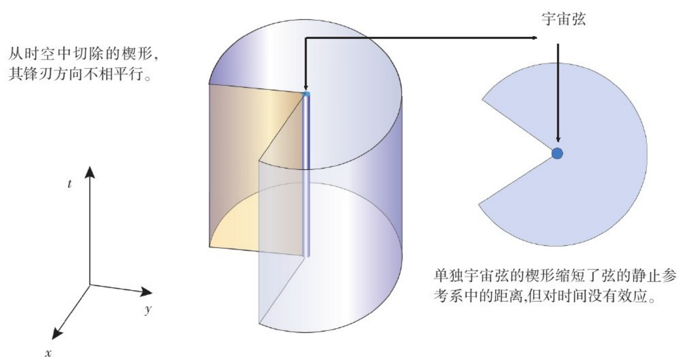


图5.6

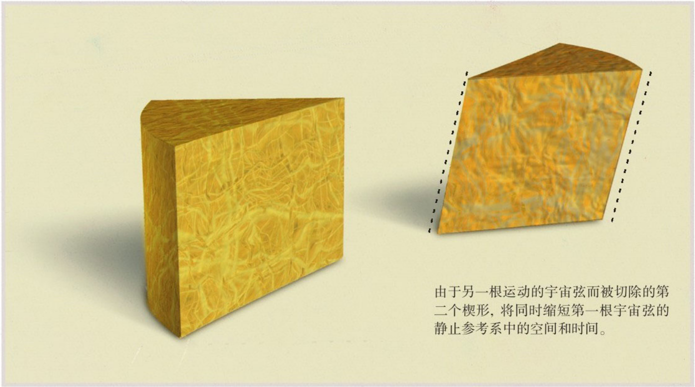


图5.7

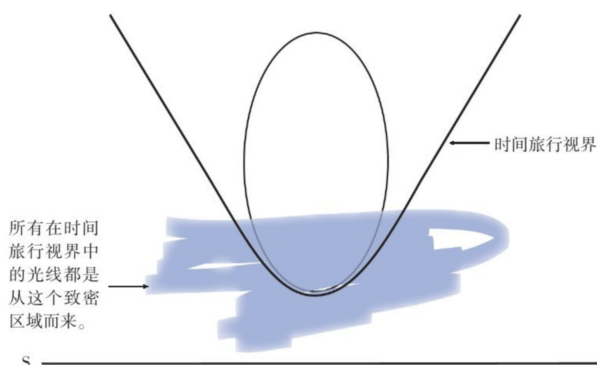


图5.8

即便是最先进的文明，也只能在有限的区域内翘曲时空。时间旅行视界，即时空中可以旅行到一个人的过去的部分的边界，是由从有限区域出现的光线组成的。

在科学中，问题的正确表述通常是解决它的钥匙，而这就是一个好例子。为了定义一台有限的时间机器意味着什么，我回到自己早期的某些研究。在存在时间圈环的时空区域是可能进行时间旅行的。时间圈环是以低于光速旅行但由于时空的卷曲仍能回到出发的地方和时间的路径。由于我已假定在遥远的过去没有时间圈环，就必须存在我称作时间旅行的“视界”，这是把具有时间圈环区域和没有它们的区域分隔开来的边界（图5.8）。



那么问题就变成，某种先进文明能建造一个时间机器吗？

时间旅行视界和黑洞视界很相像。黑洞视界由刚好不落入黑洞的光线形成，而时间旅行视界由与自身相遇的光线的边缘形成。我把以下作为我称作时间机器的有限生成视界的判据——也就是全部从一有界区域出现的光线形成的视界。换言之，它们不是起源于无限处或奇点处，而

是起源于包含时间圈环的有限区域——这是我们先进文明正要创造的那一类区域。

我们采用这个定义作为时间机器的基点，有利于使用彭罗斯和我在研究奇点和黑洞时发展的技巧。我甚至不用爱因斯坦方程就能证明，一般来讲，一个有限生成视界包含一根实际上和自身相遇的光线——也就是一根不断地返回到同一点的光线。光线每绕一圈就被蓝移一次，这样像就越变越蓝。光脉冲的波峰越来越拥挤，而光线用来绕一圈的时间间隔越来越短。事实上，以光粒子自身的时间测度来定义，它只有有限的历史，即使它在有限的区域内不断转圈而且不撞到曲率奇点上去。



图5.9　时间旅行的危险

人们也许不在乎光粒子是否在有限的时间内完成其历史。但是我还能证明存在以低于光速运动的并且只有有限持续时间的路径。这些可以是一些被陷落在视界之前的有限区域中的观察者的历史，他们越来越快地绕着圈子，并在有限的时间里达到光速。这样，如果在飞碟中的一名美艳的外星人邀你进入她的时间机器，小心止步。你也许会落入其中的一个仅有有限持续时间的重复历史的陷阱中去（图5.9）。

这些结果与爱因斯坦方程无关，但是只依赖于在有限区域中时空卷曲产生时间圈环的方式。然而，现在我们可以诘问，先进文明必须使用何种物质去卷曲时空，以建成一台有限尺度的时间机器。它能处处均有正的质量密度，正如在我早先描述过的宇宙弦时空中那样吗？宇宙弦时空不满足我的时间圈环在有限区域中出现的要求。然而人们会以为这仅仅是因为宇宙弦是无限长的。他也许会想象用有限长宇宙弦圈环建造一个有限时间机器，而且处处能量密度为正。使像基帕这样想回到过去的人失望是很遗憾的事，可惜在处处能量密度为正的条件下，这是实现不了的。我能证明，你需要负的能量才能建造有限时间机器。

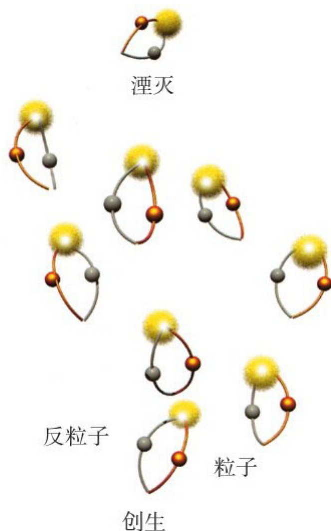


图5.11

在经典理论中能量密度总是正的，这样在这个水平上有限尺度的时间机器就被排除了。然而，在半经典理论中情形就不同了。在半经典理论中人们认为物质行为受量子理论制约，而时空是明确定义并且是经典的。正如我们已经看到的，量子理论的不确定性原理意味着，场甚至在表观上空虚的空间中也总是上下起伏，并且具有无限的能量密度。这样，为了得到我们在宇宙中观察到的有限的能量密度，人们必须减去一个无限大的量。这一减除可以使能量密度至少在局部上为负。甚至在平坦空间中，人们能找到能量密度在局部为负的量子态，虽然其总能量是正的。人们也许极想知道，这些负值究竟能否使时空以适当的方式卷曲从而建造有限时间机器。但是它们似乎理当如此。正如我们在第四章中看到的，量子涨落意味着甚至表观上空虚的空间也充满了虚粒子对，它们同时出现，相互分开，然后回到一起并相互湮灭（图5.10）。虚粒子对的一个成员将具有正能量，而另一成员负能量。当一个黑洞存在时，负能量成员能够落进，而正能量成员能逃向无限远，它在那里作为从黑洞携带走正能量的辐射而出现。负能粒子的落进引起黑洞损失质量并慢慢蒸发，其视界的尺度随着缩小（图5.11）。

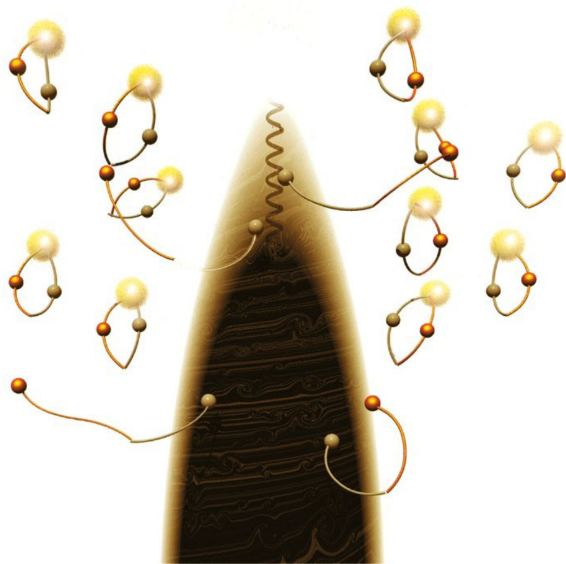


图5.10

黑洞辐射并损失质量的预言意味着，量子理论使负能量通过视界流进黑洞。为了使黑洞尺度缩小，视界上的能量密度必须为负，这正是建造一个时间机器所需要的征兆。

具有正能量密度的通常物质具有吸引引力效应，而且弯曲时空，使光线向相互方向弯折——正如同在第二章中橡皮膜上的球总是使小滚珠往它滚去而从不往外滚开一样。



我的外孙

威廉·麦肯锡·史密斯

这意味着黑洞视界面积只能随时间增大，而决不缩小。为了使黑洞视界的尺度缩小，视界上的能量密度必须是负的并且弯曲时空使得光线相互发散开去。这是在我女儿出生后不久上床时首次意识到的。我除了告诉你我有了外孙外，不愿意说这发生于多久以前。

黑洞的蒸发表明，在量子水平上能量密度有时可以是负的，并且在建造时间机器需要的方向上弯曲时空。这样我们可以想象，某一非常先进的文明能将事情安排妥当，使能量密度足够负，从而形成诸如航天飞船之类的宏观物体能利用的时间机器。然而，在黑洞视界和时间机器视界之间有一重要差别。前者是由一直不断前进的光线组成，而后者包含有不断转圈的闭合光线。一个沿着这种闭合轨道运动的虚粒子会不断重复地把它的基态能量带回到同一点。因此，人们可以预料，在视界——也就是时间机器的边界上的能量密度是无限的。时间机器是人们可以旅行到过去的区域。在一些简单得可做准确计算的背景中的直截明了的计算中，这一点得到了证实。这表明穿过视界进入时间机器的人或者空间探测器会被辐射暴所毁灭（图5.12）。这样，就时间旅行而言，未来是黑暗的——或者是否应该说是令人眩目的白。

物体的能量密度依它所处的态而定，所以先进的文明也许可以把不断围绕一个闭合圈环运动的虚粒子"逐出"或取掉，使得时间机器边界上的能量密度变成有限的。然而，这样的时间机器是否稳定仍然不清楚：最小的扰动，譬如某人穿过视界进入该时间机器，可能激活了循环的虚粒子并引发闪电。这是一个物理学家应该能自由讨论而不被嘲笑的问题。即便结果是时间旅行不可能，我们也理解了为何如此，而这一点是重要的。



图5.12

当人们越过时间旅行视界时，会被辐射的闪电摧毁。

为了确定地回答这个问题，我们不仅需要考虑物质场的，而且也要考虑时空本身的量子涨落。人们也许预料到，这些会引起光线的轨迹以

及整个时序概念上的朦胧模糊。的确，因为时空的量子涨落意味着视界不是准确定义的，人们可以把来自黑洞的辐射认为是泄漏。因为我们还没有量子引力的完整理论，很难说时空起伏的效应应是怎样的。尽管如此，我们能指望从在第三章中描述的费恩曼对历史求和中得到一些提示。

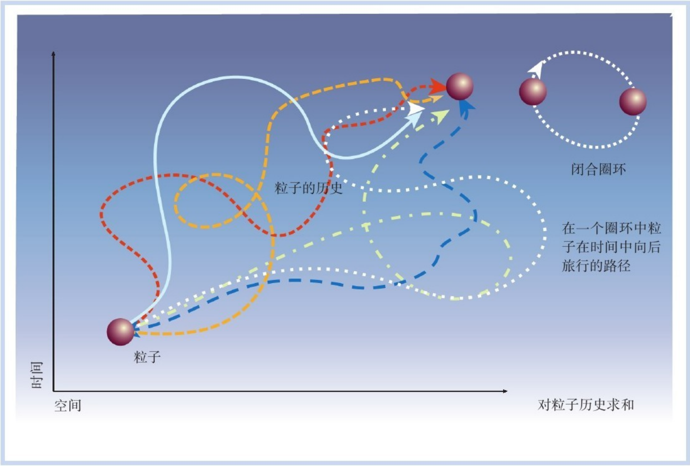


图5.13

费恩曼的历史求和必须包括粒子在时间中往回走的历史，甚至还包括在时间和空间中的闭合圈环。

每一个历史都是弯曲时空以及其中的物质场。由于我们打算对所有可能的历史，而不仅是那些满足一些方程的历史求和，这个求和应当包含卷曲到足以旅行到过去的时空在内（图5.13）。这样，问题就变成，为何时间旅行不到处发生呢？其答案是，时间旅行的确发生于微观尺度上，但是我们觉察不到。如果人们将费恩曼的历史求和思想应用于一个粒子上，它就必须包含粒子旅行得比光还快甚至向时间过去旅行的历史。尤其是，存在粒子在时间和空间中的一个闭合圈环上不断循环的历史。这就像影片《圣烛节》中的记者必须不断地重复过同一天一样（图5.14）。

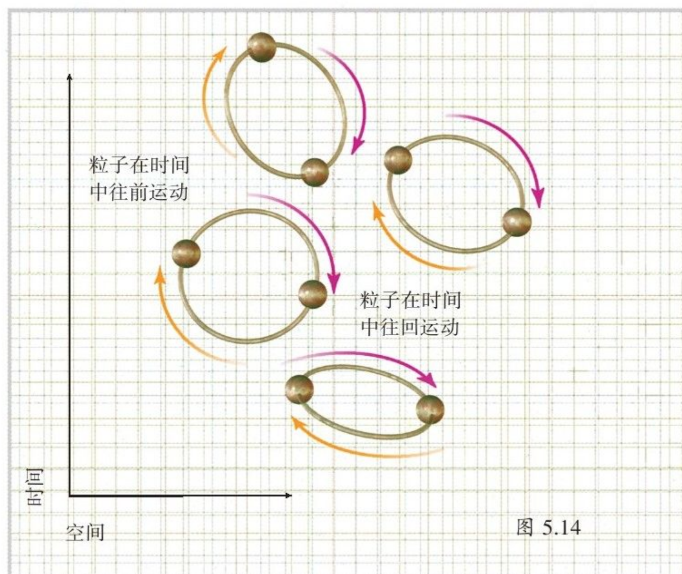


图 5.14

人们不能用粒子检测器来直接观测这种处于闭合圈环历史中的粒子。然而，在许多实验中已经测量到它们的间接效应。有一个实验是由在闭合圈环中运动的电子引起的氢原子光谱的微小位移。另一个实验是两片平行金属板之间的很小的力，这是由以下事实引起的：和平板之间相调适的闭合圈环历史比和外面区域相调适的历史稍少——卡西米尔效应的另一种等效解释。这样，实验验证了闭合圆环历史的存在（图 5.15）。

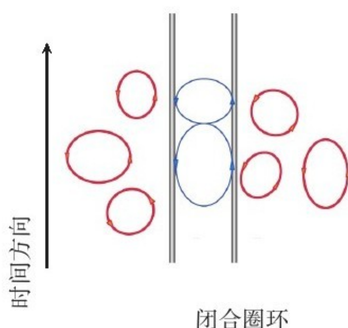


图5.15

人们也许会争辩道，由于闭合圈环历史甚至在固定的背景诸如平坦空间中发生，它们和时空卷曲有何相干。但是近年我们发现物理学中的现象通常具有对偶的同样成立的描述。人们可以等价地说，粒子在给定

的背景中沿一个闭合圈环运动，或者粒子固定不动而空间和时间围绕着它起伏。这只不过是你是首先对粒子轨迹求和然后再对弯曲时空求和，还是以相反的顺序求和的问题。

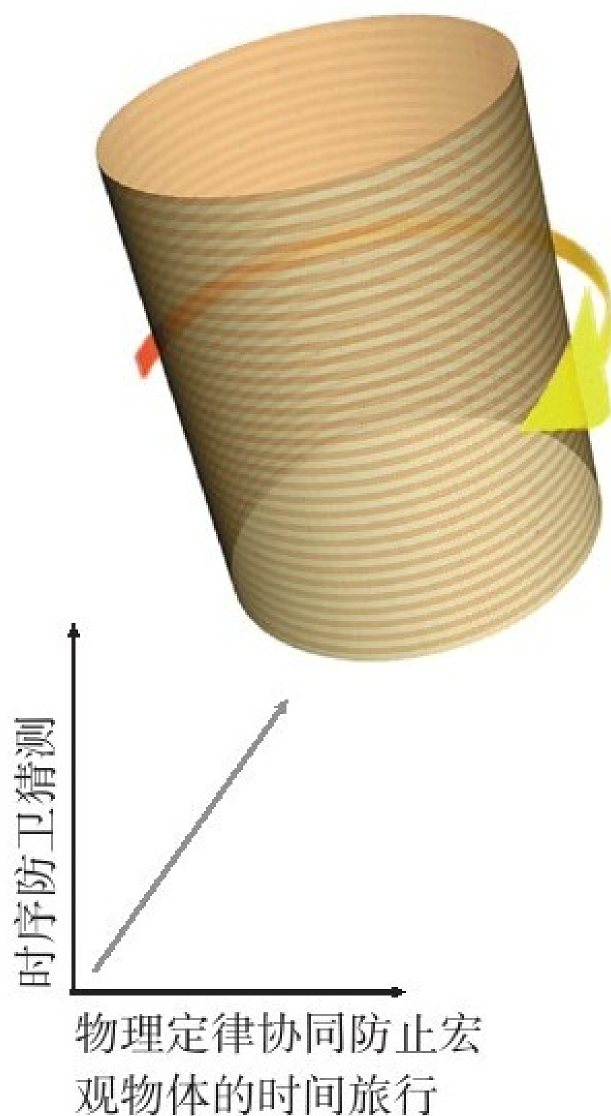


图5.16

爱因斯坦宇宙像是一个圆柱面，它在空间中有限而在时间中不变。因为其有

限的尺度，在任何地方它都能够以小于光的速度旋转。

因此，量子理论看来允许在微观的尺度上的时间旅行。然而，这对于科学幻想，诸如你回到过去杀死你祖父之类的目的没有多大用处。因此，问题就变成：在对历史求和中的概率能否在具有宏观时间圈环的时空附近取得峰值呢？

人们可以这样研究这个问题，考虑在一系列越来越接近允许时间圈环的时空背景中的物质场的历史求和。人们预料，在时间圈环首次出现时刻会出现某种戏剧性事件，而这正是被我和我的一名学生迈克·卡西迪研究的一个简单例子所证实的。

在我们的一系列研究中的背景时空和所谓的爱因斯坦宇宙紧密相关。当爱因斯坦相信宇宙在时间上是静止不变，既不膨胀又不收缩时提出了这种时空（见第一章）。在爱因斯坦宇宙中时间从无限的过去向无限的将来流逝。然而，空间方向是有限的并且自身闭合，如同地球的表面一样，只是多了一维。人们可以把这时空画成一个圆柱面，长轴是时间方向，而截面是三个空间方向（图5.16）。

因为爱因斯坦宇宙不膨胀，所以它不代表我们在其中生活的宇宙。尽管如此，因为它简单，人们可以作对历史的求和，所以在讨论时间旅行时利用它作为背景很方便。暂时忘记一下时间旅行，考虑在爱因斯坦宇宙中围绕着某个轴旋转的物质。如果你位于轴上，你可以留在空间的同一点，正如你站在儿童旋转木马的中心。但是如果你不在轴上，你就以围绕着轴旋转的方式在空间中运动。你离开轴越远，就运动得越快（图5.17）。这样，如果宇宙在空间方向是无限的，则离开轴足够远的地方必须旋转得比光还快。然而，因为爱因斯坦宇宙在空间上是有限的，所以就存在一个旋转的临界速度，低于这个临界速度时宇宙中沒有任何部分旋转得比光快。

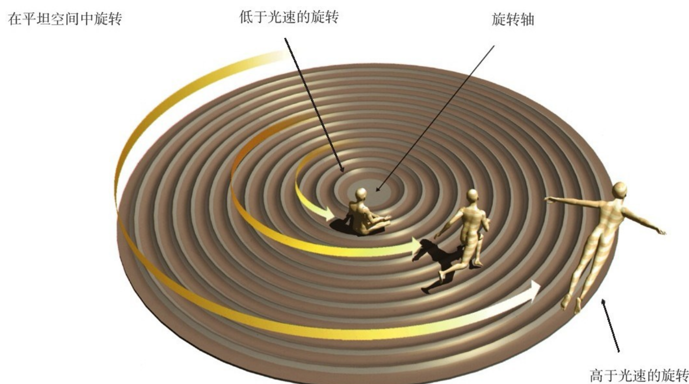


图5.17

在平坦空间中刚体在远离其轴处运动得比光速还快。

现在考虑对一个旋转的爱因斯坦宇宙中的粒子历史求和。当旋转很慢时，对于给定的能量粒子历史可以采用许多路径。这样对在这样的背景中的所有粒子求和就会得到大的幅度。这意味着，在对所有弯曲时空的历史求和中这个背景的概率是高的，也就是说，它是更可能的历史之一。然而，随着爱因斯坦宇宙的旋转速度达到临界值，使得它外缘的运动速度达到光速，在边缘上只存在一个经典允许的粒子路径，也就是以光速运动的路径。这意味着对粒子历史的求和将很小。这样，对所有弯曲时空历史求和中这些背景的概率很低。也就是说，它们是最不可能的。

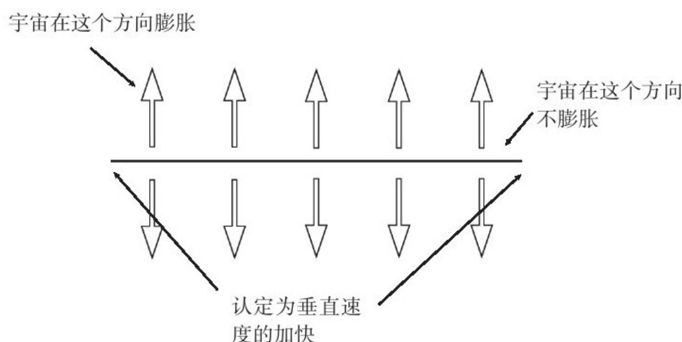


图5.18　具有闭合的类时曲线的背景

旋转的爱因斯坦宇宙和时间旅行以及时间圈环有何相干呢？其答案是，它们和其他允许时间圈环的背景是数学上等价的。这些其他背景是在两个空间方向膨胀的宇宙。该宇宙在第三个空间方向不膨胀，这个方

向是周期性的。这也就是说，如果你在这个方向走一定的距离，就会回到出发点。然而，每次你在第三个空间方向走一圈，你在第一和第二方向的速度都被加快上去（图5.18）。



基帕能回到过去并杀死其祖父的概率是$1/10^{10^{60}}$。

如果加快得很小，就不存在时间圈环。然而，考虑一个速率加快不断增加的背景的序列。当加快达到某一临界值时时间圈环就要出现。这一临界加快对应于爱因斯坦宇宙的临界旋转速度，这是可以想见的。由于在这些背景中对历史求和计算是数学上等效的，人们可以得出结论，当这些背景达到实现时间圈环需要的卷曲时，它们的概率为零。这就支持了我在第二章末提到的所谓的时序防卫猜测：物理定律协同防止宏观物体的时间旅行。

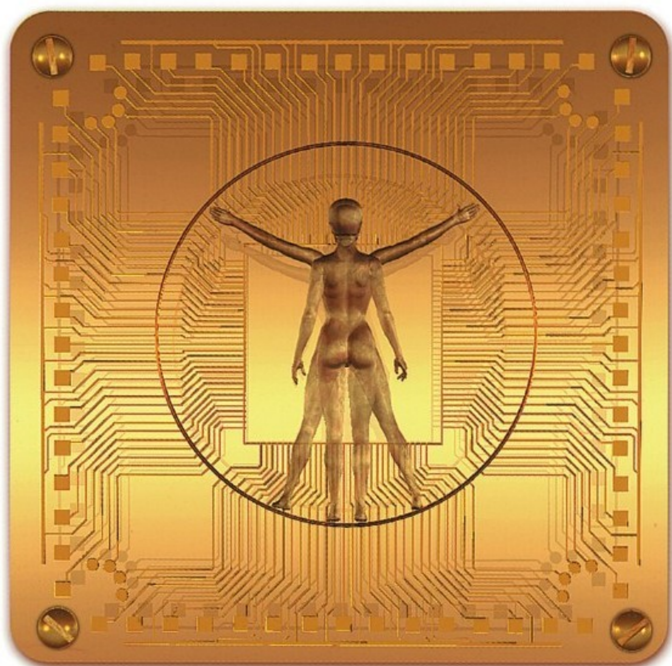
虽然历史求和允许时间圈环，其概率极为微小。基于我早先提及的对偶性论证，我估计基帕·索恩能回到过去并杀死其祖父的概率小于一后面跟一万亿亿亿亿亿亿亿个零分之一。



第六章

我们的未来？“星际航行”可行吗？

生物和电子生命将如何不断加速发展其复杂性。



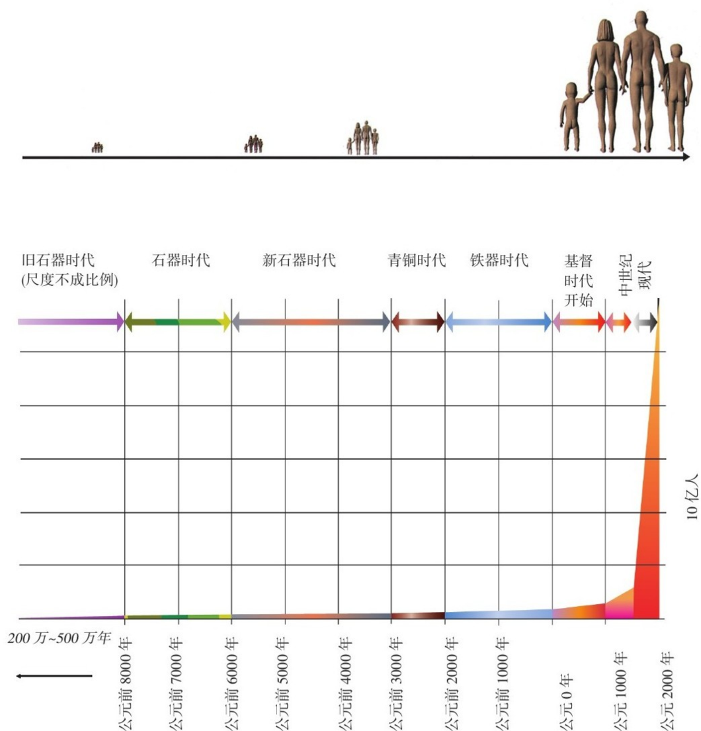


图6.1 人口增长



《星际航行》的一个镜头，牛顿、爱因斯坦、达他舰长和我本人在玩扑克。

因为《星际航行》是关于未来的安全而舒适的幻影，所以广受欢迎。我自己也算是一名《星际航行》迷，这样便很容易被说服去客串了一

集。在那一集中我和牛顿、爱因斯坦以及达他舰长玩扑克，我把他们全打败了。可惜警报出现，所以我从未收到我的赢钱。

《星际航行》展现了一个在科学、技术和政治组织远比我们先进的社会（最后一点也许并不困难）。在现时和那时之间一定会有巨大的改变以及与之相伴随的紧张和混乱，但是在剧中描述的时期，科学、技术和社会组织据说已达到几乎完美的水平。

我想质疑这种场景并诘问，我们是否会在科学和技术上达到一种最终的稳定的状态。从上一次冰河时期迄今的大约一万年左右人类知识和技术一直在演化着。也出现过一些挫折，例如在罗马帝国崩溃之后的黑暗时代。但是世界人口，作为我们维持生命和养活自己的技术能力的测度一直在稳步上升，除了一些诸如黑死病的小起伏以外（图6.1）。

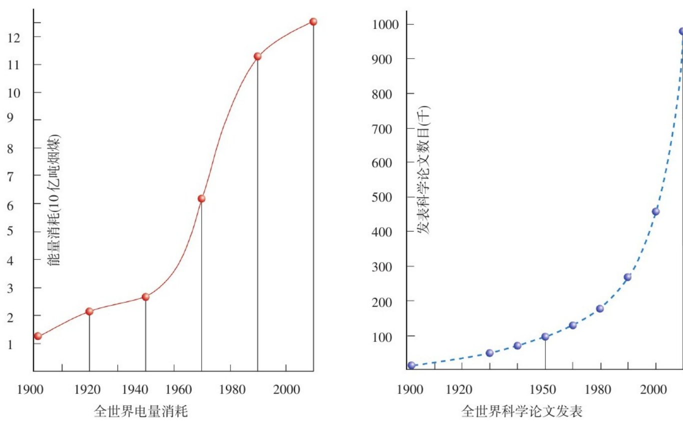


图6.2

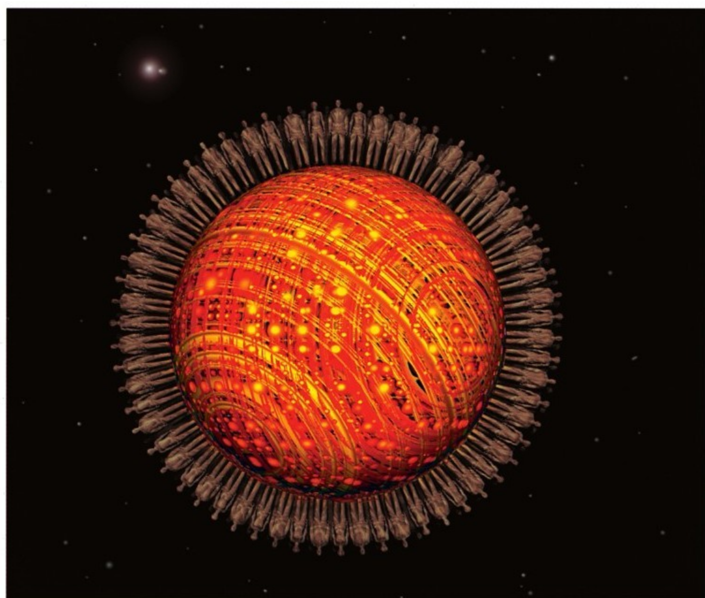
左图：全世界能量消耗，以10亿吨烟煤为计量单位，1吨烟煤的燃烧值相当于8130千瓦小时。

在前两个世纪，人口的增长变成指数式的，也就是说每年的人口增加同样的百分比。这个增长率现在大约为每年1.9%。这听起来似乎不很多，但是它意味着世界人口每40年要增加1倍（图6.2）。

右图：每年发表的科学论文数。垂线的单位是千。1900年为9 000。1950年为90 000。而2000年为900000。

电力消耗和科学论文的数目是近代技术发展的另外的测度。它们也是指数增长的，并在短于40年的时间内加倍。没有任何迹象表明，在最

近的将来科学技术的发展会缓慢下来甚至停止——直到《星际航行》时代这肯定不会发生。这个时代被认为在不那么遥远的将来。但是如果人口增长和电力消耗增加继续现在的速率，世界人口到2600年将会到达擦肩摩踵的程度，到那时地球会因大量使用电力而发出红热的光芒（见对面插图）。



地球人口在2600年将会到达擦肩摩踵的程度，到那时地球会因使用电力而发出红热的光芒。

如果你把正在出版的所有新书一本本地堆放，你必须至少以每小时90英里（1英里＝1.609千米）的速度运动才能追赶上它的尽头。当然，到了2600年新的艺术和科学著作将以电子形式出版，而不用形体的书报。尽管如此，如果继续这种指数增长，在我的理论物理领域每秒钟就有10篇新论文出现，根本来不及阅读。

很清楚，目前的指数增长不可能无限继续下去。那么将会发生什么呢？一种可能性是我们被某些灾难，譬如核战争毁灭殆尽。有一个黑色幽默讲，我们之所以未被外星人接触，是因为当一种文明到达我们的发展阶段时，就变得不稳定而且毁灭自身。然而，我是一名乐观主义者。我相信，人类到达今天这样的境界，事物变得这么有趣，绝非仅仅为了把自己毁灭。



图6.3

《星际航行》是发生在“探险号”上的故事，这是个像上图的星际飞船，它能够以翘曲速度旅行，它比光速快多了。然而，如果时序防卫猜测是正确的话，我们就必须用火箭推进的航天飞船来探索星系，它比光行进得慢。

《星际航行》对未来的憧憬——也就是我们达到先进的但是本质上静态的水平，就我们对制约宇宙的基本定律的知识而言，是可以实现的。正如我将要在下一章中描述的，也许存在一个我们将会在不太遥远的未来发现的终极理论。如果这个终极理论存在的话，它将要确定《星际航行》式的翘曲飞行能否实现。按照现在的观念，我们必须利用运动得比光还慢的航天飞船，以一种缓慢和冗长乏味的方式去星系探险；但是由于我们尚未拥有完备的统一理论，我们还不能完全排除翘曲飞行（图6.3）。



另一方面，我们已经知道在除了最极端情形外都成立的定律：制约“探险号”全体船员的定律，如果不制约航天飞船本身的话。但是我们在利用这些定律上或者利用它们制造的系统的复杂性上，似乎永远不会达到一种稳恒的状态。本章的其余部分正是讨论这种复杂性。

我们迄今为止拥有的最复杂系统是我们自己的身体。生命似乎起源于太初海洋之中，太初海洋在40亿年前覆盖着地球。我们不知道这是怎么发生的。也许是原子间的随机碰撞构成了宏观分子，这些宏观分子能复制自己并且将自己聚集成更复杂的结构。我们能确切知道的是，到35亿年之前，高度复杂的DNA分子已经出现。

DNA是地球上所有生命的基础。它具有双螺旋结构，犹如螺旋状楼梯，它是在1953年于剑桥的卡文迪许实验室由弗朗西斯·克里克和詹姆斯·沃森发现的。双螺旋的两条由碱基对连接，正如螺旋楼梯中的踏板。DNA中有4种碱基：胞嘧啶、鸟嘌呤、胸腺嘧啶和腺嘌呤。碱基沿着螺旋楼梯排列的顺序携带遗传信息，它使DNA分子在它周围集合有机体并复制自己。当DNA复制自身时，碱基沿着螺旋的顺序或比例会偶尔出错。在大多数情形下，复制的错误使DNA或者不能，或者较不可能去复制自己，这意味着这种遗传误差，或者它们被称作突变的会死去。但是在一些情形下，这误差或者突变将会增加DNA存活和繁殖的机会，遗传密码的这种改变会是有利的。这就是包含在DNA序列中的信息逐渐演变并且变得更复杂的过程（图6.4，见162页）。

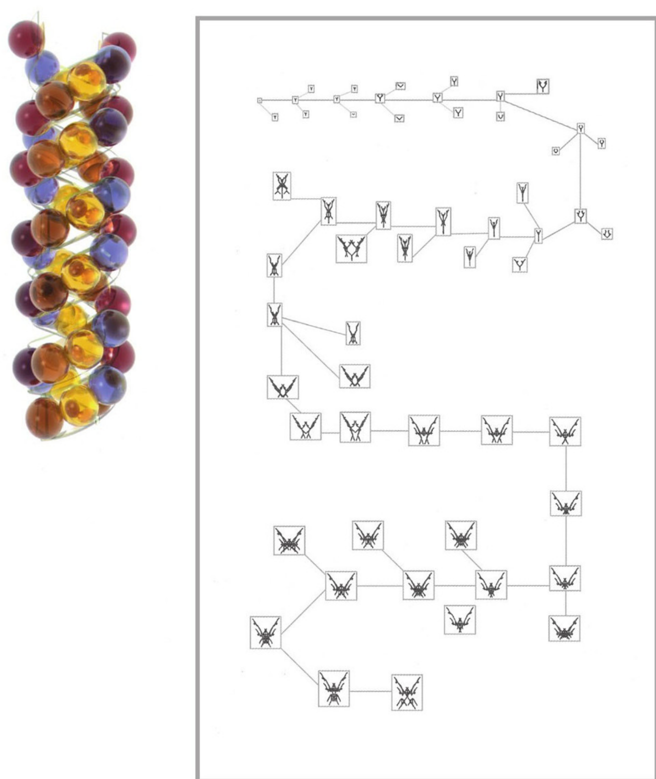


图6.4　进化

右边的图是电脑生成的生物演变系列图，其演变程序是生物学家里查德·道金斯设计的。

特定种族的存活依赖某些诸如“有趣”、“不同”或“类似昆虫”的简单性质。

从一个单独像素开始，早先的随机生殖通过一个和自然选择类似的过程发

展。道金斯令人印象深刻地只用29代就培育了类似昆虫的形式（伴随有许多进化死亡的结果）。

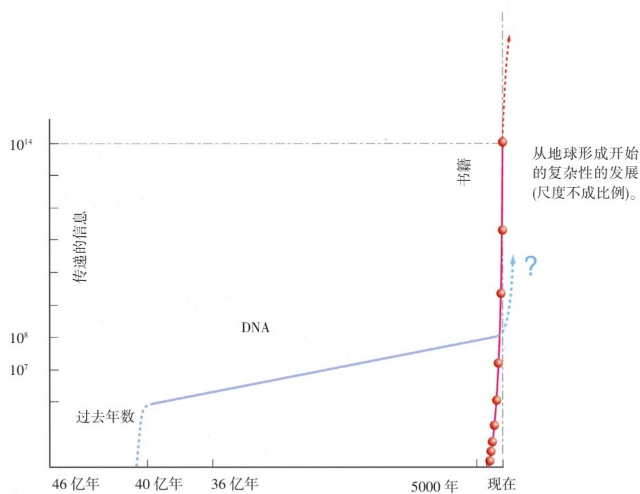
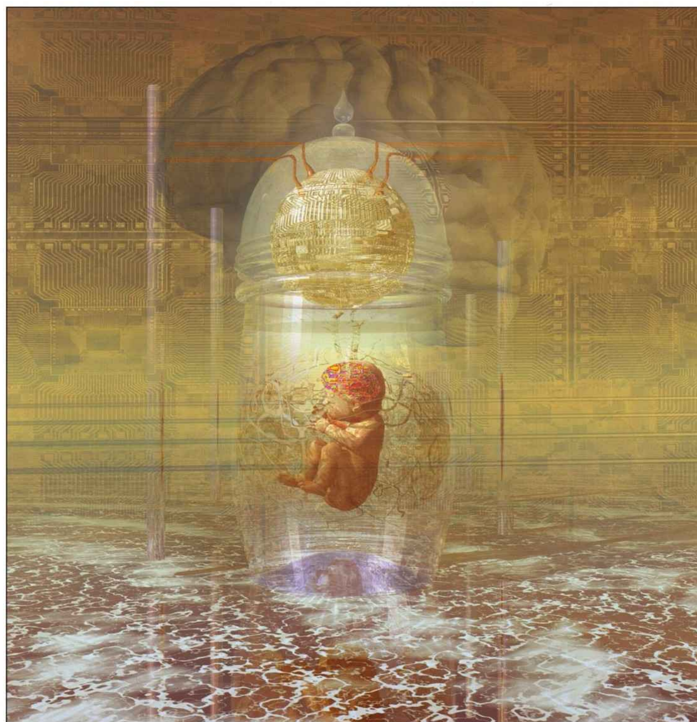




图6.5

因为生物进化基本上是在所有遗传可能性空间中的随机漫游，所以它非常缓慢。其复杂性或者被编码于DNA中的信息的比特数大致为分子中的碱基数目。在最初的20亿年左右，其复杂性增加率应该是每百年一个比特信息的数量级。DNA复杂性增加率在最近的几百万年里逐渐地上升到每年1比特左右。但是后来，大约6000～8000年以前，发生了重大的新的进展。我们发展了书写语言。这意味着，信息从这一代向下一代转移，不必等待非常缓慢的随机突变和自然选择把它编码到DNA的序列的过程。复杂性的量被极大地增加。一本浪漫小说就够储存关于猿和人类DNA差别的那么多信息，而30卷百科全书可以描述人类DNA的整个序列（图6.5）。



在人体之外长大的胚胎可具有更大的大脑和更好的智力。

更重要的是，书中的信息可以快速地更新。现在人类DNA由于生物进化引起的更新率大约为每年1比特。但是每年出版20万种新书，相当于新信息率超过每秒100万比特。当然，大部分信息都是垃圾。但是即使100万比特中只有1比特是有用的，那仍然比生物进化快10万倍。



在现时卑微的蚯蚓大脑的计算能力仍然超过我们的电脑。

这种通过外部的非生物手段的资讯传递使人类凌驾于世界之上并使人口指数地增长。但是我们现在处于新时代的启始，在这新时代里我们不需等待生物进化的缓慢步骤就能增加我们内部记录即DNA的复杂性。在最近的1万年中人类DNA上没有什么显著的改变，但是在以后的1000年我们很有可能将其完全重新设计。当然，许多人说人类遗传工程应该被禁止，但是我们能否防止它是很令人可疑的。为了经济的原因将允许植物和动物的遗传工程，而有些人一定会去对人类进行尝试。除非我们有一个极权的世界制度，否则总有人将在某处设计改良人种。

很清楚，创造改良的人种相对于未改良的人种会产生巨大的社会和政治问题。我不想将人类遗传工程当作必然发展来辩护，我只不过是说，不管我们要不要，它都很可能发生。这就是为什么我不相信《星际航行》那样的科学幻想，在那里400年后的未来人们和我们今天本质上是相同的。我认为人种及其DNA将相当快速地增加其复杂性。我们应该

认识到这很可能发生，而且考虑如何去应付这种局面。

如果人类要去应付它周围日益复杂的世界和遭遇到诸如太空旅行这样的新挑战的话，它必须以某种方法改善其精神与体魄。如果生物系统总想领先电子系统的话，人类也需要增加自己的复杂性。电脑在现时具有速度的优势，但是它们毫无智慧的迹象。这并不奇怪，因为我们现有的电脑比一根蚯蚓的大脑还简单。蚯蚓是一种智力微不足道的物种。

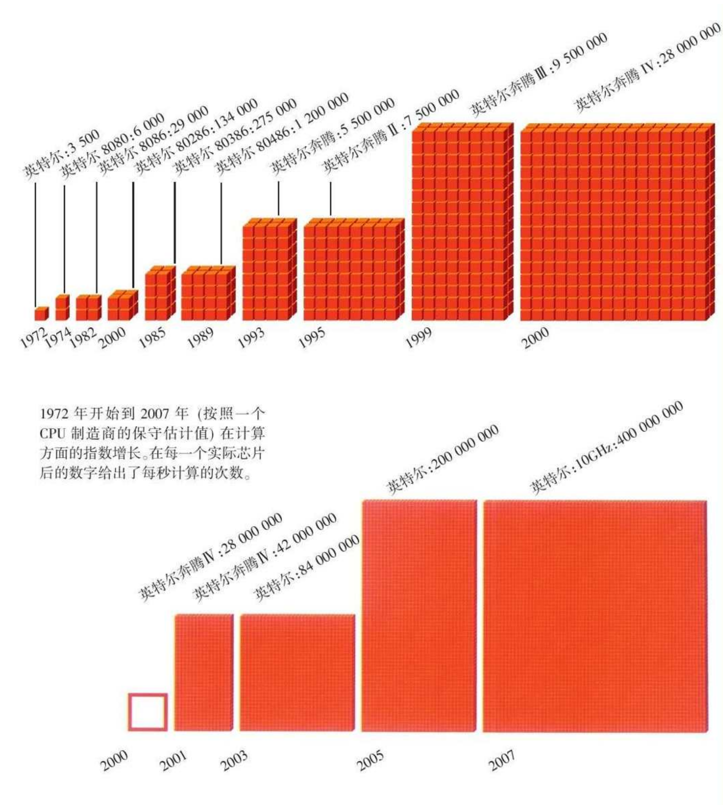


图6.6



神经的植入将会加强记忆，而且诸如整个一种语言或者这本书的内容的信息包可在几分钟内学会。这样加强的人类和我们自己极不相似。

但是，计算机服从所谓的穆尔定律：它们的速度和复杂性每18个月增加1倍（图6.6）。它是那些显然不能无限继续的指数增长之一。然而，它也许会继续到电脑具有类似于人脑的复杂性为止。某些人说计算机永远不能显示真正的智慧，不管这智慧是指何而言。但是我似乎觉得，如果非常复杂的化学分子能在人体运行使他们具有智慧，那么同等复杂的电子线路也能使电脑以一种智慧的方式行为。而且如果它们是智慧的，它们也应该能设计出甚至具有更大的复杂性和智慧的电脑。

生物和电子复杂性的这种增加会永远继续下去吗？或是存在一个自然的极限？在生物方面，迄今的人类智慧的极限被通过产道的大脑尺度所定。我目睹我三位孩子的出世，知道让头出来是如何困难。但是，我预料在100年内，我们将能够在人体之外养育婴儿，这样这个限制就被消除了。然而，通过遗传工程增加人脑尺度最终会遭遇到这样的问题，即身体中负责我们精神活动信息的化学信使运动较慢。这意味着，进一步提高大脑的复杂性将会以速度为代价。我们可能才思敏捷或者非常智慧，但是两者不可得兼。我仍然认为，我们可以比《星际航行》中的大部分人有智慧得多，那不是什么困难的事。

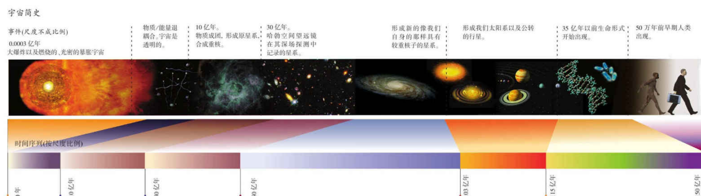


图6.7

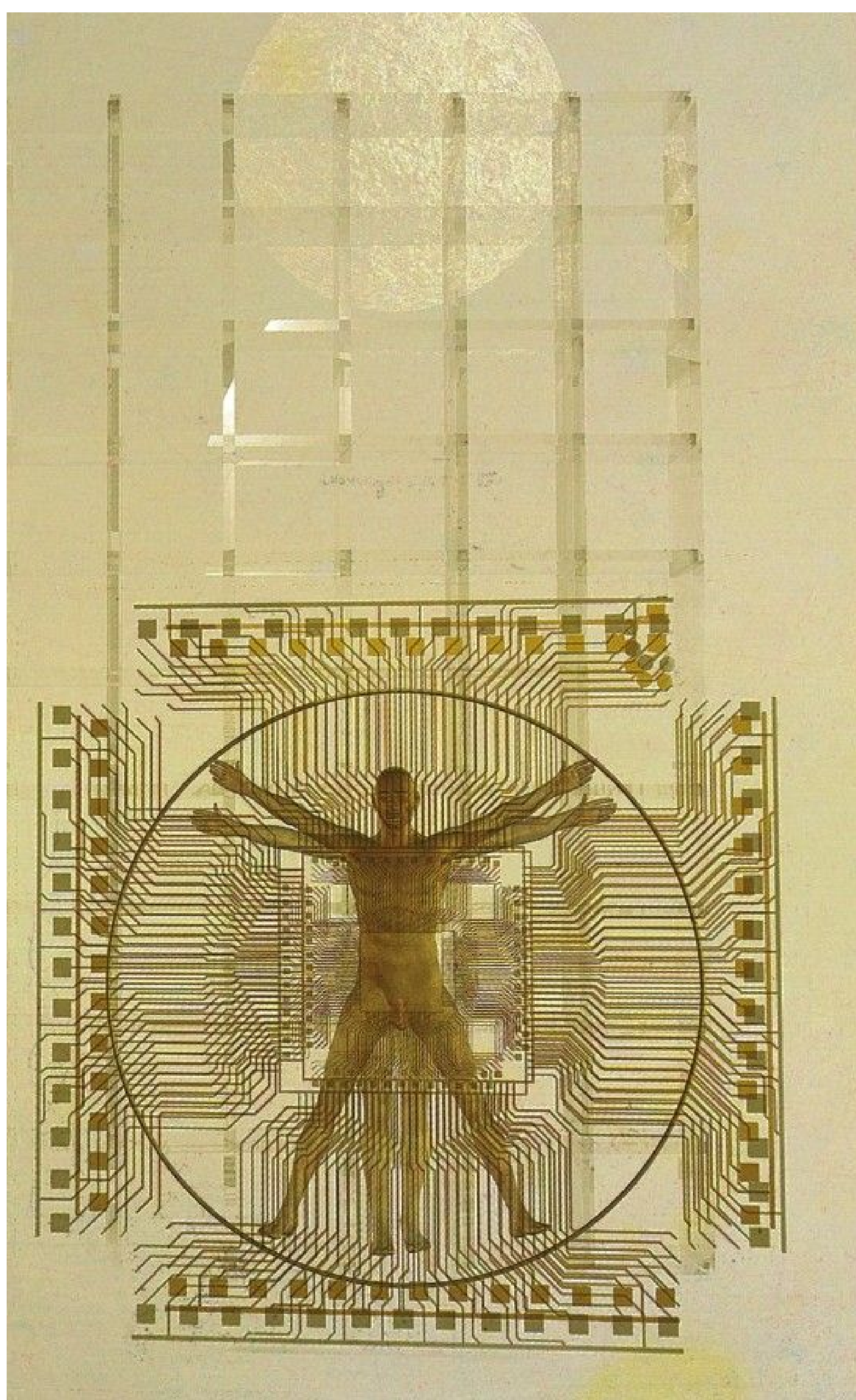
人类的存在只占宇宙历史极微小的部分（如果这张图是按比例的，而人类存在的长度7厘米，那么宇宙的整个历史超过1千米）。我们遭遇的任何外星生命很可能比我们更低级得多或者更先进得多。



电子线路具有和人脑一样的复杂性对速度的问题。然而，在这种情形下信号是电子的，而不是化学的，它以光速运动，速度快多了。尽管如此，光速已经是设计更快速电脑的实际极限。人们可以进一步降低线路尺度以改善这种局面，但最终将有一个由物质原子性质设下的极限。我们在遇到这个障碍之前仍有一段路可走。

电子线路在保持速度之际能够增加其复杂性的另一种方法是去复制人脑。大脑不具备单独的CPU——中央处理器——它依次处理每一个指令。相反，人脑有几百万个同时一道工作的处理器。这种大规模并行处理也将是电子智慧的未来。

假定我们在以后的100年不把自身毁灭，我们将很可能首先分散到太阳系的行星去，然后再到邻近的恒星去。但是不会像在《星际航行》或《巴比伦5号》中那样，在几乎每一个恒星系统都有接近人类的新种族。我们人种以它目前的形式仅仅存在了从大爆炸以来的150亿年左右中的200万年（图6.7）。



生物-电子接合

在20年之内一台值1 000美元的计算机就会和人脑一样复杂。并行处理器可以模仿我

们大脑工作的方式，并且使计算机以智慧的有意识的方式行为。

神经的植入可以允许大脑和电脑之间的更快速得多的接合，化解了生物和电子智慧之间的距离。

在最近的将来，大多数商业交易很可能是在网人之间通过万维网来进行。

在10年之内，我们中的许多人甚至选择一种在网上的虚拟存在的生活，形成网上友谊和关系。

我们对人类基因的理解无疑将大大推进医学，但是它也将使我们明显地增加人类DNA结构的复杂性。在以后的几百年间，人类遗传工程会取代生物进化，重新设计人种并且提出崭新的道德问题。

到我们太阳系以外进行太空旅行很可能需要遗传工程处理过的人类或者无人的计算机控制的探测飞船。



智慧具有许多长期存活的价值吗？

这样，即使生命在其他恒星系统发展，在它可被认出为人类阶段邂逅它的机会也非常渺茫。我们将遭遇到的外星人的生命很可能要么更为原始得多，要么更为先进得多。如果它更先进，为何不分散到整个星系并且造访地球呢？如果外星人曾经来过，它必须是显而易见的：与其像影片《外星人》不如说更像影片《独立日》。

那么，如何解释我们没有地球外的来客呢？可能是在那里存在有先进的种族，它知悉我们的存在，但是让我们在低水平上自作自受。然而，如此照应低等的生命形式是令人可疑的：我们中的大多数人忧虑过在脚下被踩死多少昆虫或者蚯蚓吗？更合理的解释应该是，在其他行星上不管是生命的发展还是生命发展智慧的概率都非常小。因为我们宣称自己是智慧的，尽管也许没有什么根据，我们倾向于把智慧看成进化的不可避免的后果。然而，人们可以对此置疑。不清楚智慧是否具有更多

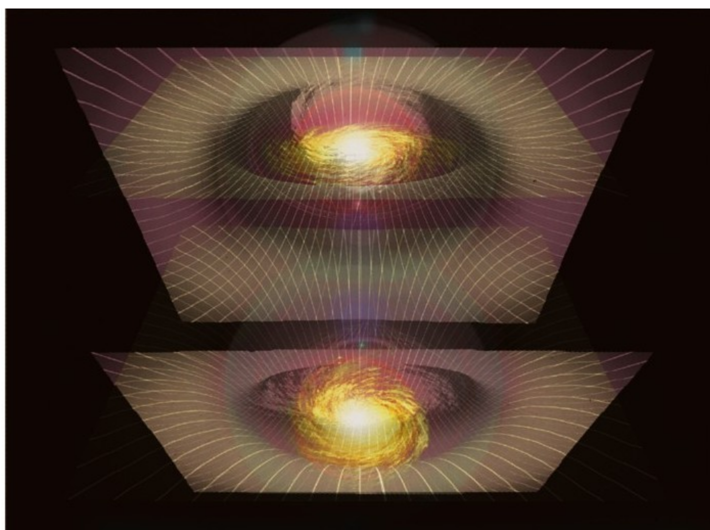
的存活价值。细菌虽然没有智慧，但是存活得很好。如果我们所谓的智慧在一场核战争中毁灭自身的话，细菌仍然存活。这样在我们探索星系之际，我们也许发现初级生命，但是我们不太可能找到像我们的生物。

科学的未来不会像在《星际航行》中描绘的那么令人宽慰的图景：一个充满了许多有人类特征的种族的，具有先进的但本质上静止的科学技术的宇宙。而我认为，我们将独自地但是快速地发展生物和电子的复杂性。在以后的100年间这方面的发展不会太多，这就是我们所能可靠预言的一切。但是，如果我们能够存活到下一个千年之末，那时候我们和《星际航行》的差别将会是根本的。

第七章

膜的新奇世界

我们生活在一张膜上熏或者我们只不过是张全息图？



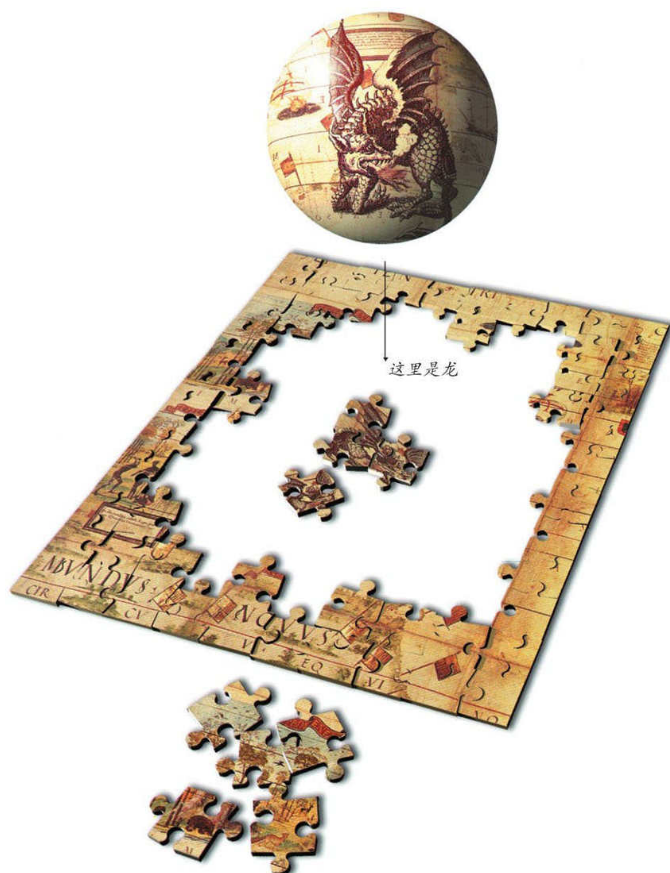


图7.1

M理论像一个拼图玩具。容易辨认围绕着拼图边缘的小片并将其嵌在一起，但是我们对在中央会发生什么知道很少，在那里我们不能作这样的近似，使其总有一个量是很小的。

我们的发现旅程在将来会走向何方呢？我们在寻找制约宇宙和其中一切的完备统一理论上能取得成功吗？事实上，正如在第二章中描述过的，我们也许已把万物理论认同于M理论。尽我们所知，这种理论不拥有单一的表述。相反，我们发现了一个表观上不同的理论的网络，所有这些理论似乎是同样的内在的基本理论在不同极限下的近似，正如牛顿引力论是爱因斯坦广义相对论在弱引力场极限的一种近似一样。M理论像是拼图玩具：最容易辨认围绕着拼图边缘的小片并将其嵌在一起，这正是M理论中某些量很小的极限。我们现在对这些边缘了解得相当

好，但是在M理论拼图的中央仍有缝隙空洞，我们不知道在空洞处究竟是怎么回事（图7.1）。在我们没有把这空洞填满之前，实在不能宣称已经找到了万物理论。

在M理论的中心是什么呢？我们将会像在那些未探险的土地的老地图上一样发现龙（或者某些同样奇怪的东西）吗？我们过去的经验提示，只要我们将我们观测的范围延伸到更小尺度，我们就很可能发现意外的新现象。在20世纪初我们理解在经典物理尺度下的自然行为。经典物理在从上至恒星际距离下到大约1%毫米的范围内成立。经典物理假定，物体是具有诸如弹性和黏滞性性质的连续媒体。但是物体不是光滑的而是颗粒性的证据开始出现：物体是由微小的称作原子的构件组成的。原子这个词源自希腊，意为“不可分的”，但是人们很快发现原子不是不可分的；它们由质子和中子构成的核和围绕它公转的电子组成（图7.2）。



十一维超引力

20世纪的最初30年原子物理的研究使我们理解小到百万分之一毫米的尺度。然后我们发现质子和中子由更小的称为夸克的粒子组成（图7.3）。

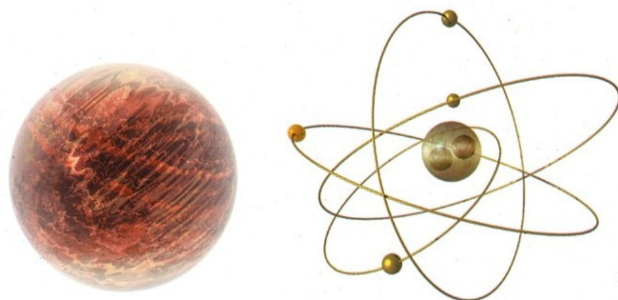


图7.2

右图：经典不可分原子。

最右面：在一个原子中电子围绕着质子和中子组成的核公转。

我们当代关于核子和高能物理的研究又将我们带到比上述的还小10亿倍的尺度。我们似乎可以无限继续下去，发现在越来越小的尺度下的结构。然而，这个序列存在一个极限，如同俄罗斯套娃，一个娃娃内部套有更小的娃娃（图7.4）。

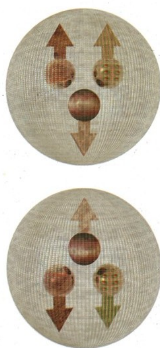


图7.3

上图：一个质子由两个具有正的2/3电荷的上夸克和一个具有负的1/3电荷的下夸克组成。

下图：一个中子由两个具有负的1/3电荷的下夸克和一个具有正的2/3电荷的上夸克组成。

最终，人们达到最小的娃娃它再也不能被拆开了。物理学中最小的娃娃是所谓的普朗克长度。为了探测更短的距离需要这么高能的粒子，这些粒子处于黑洞之中。我们不能准确知道M理论中的基本普朗克长度是多少，但是它可能小到一毫米除以一亿亿亿亿。我们不准备建造一个可探测那么小距离的粒子加速器。该加速器肯定会比太阳系还要大，这种规划在当前的财政气候下多半不会得到批准（图7.5）。

然而，最近有了一个激动人心的新进展，表明我们更容易（也更便宜）地至少发现M理论中的某些龙。正如在第二章和第三章中解释的，在M理论的数学模型网络中，时空具有十维或十一维。人们直到最近还

认为6个或7个额外维全都被卷曲得非常微小。它们就像人的头发（图7.6）。

图7.4　每个娃娃代表对自然的小到某一尺度的理论认识。每个娃娃都包含一个更小的娃娃，后者对应于在更短尺度下描述自然的理论。但是在物理学中存在一个最小基本长度，即普朗克长度，这是自然可以用M理论描述的尺度。

图7.5

探测普朗克长度那么小距离的加速器的尺度会比太阳系直径还要大。

如果你透过放大镜来看头发，就能看到它的粗细，但用肉眼就只能看到一根线，只有长度而没有其他维。时空可能是类似的，它在人体、原子甚至核物理的尺度下显得是四维的，并且几乎是平坦的。另一方面，如果我们用极高能粒子探测非常短的距离，我们应该看到时空是十维或者十一维的。

如果所有附加的维都非常小，观察到它们则是非常困难的。然而，最近有人提议一个或者更多的额外维也许较大，或者甚至是无限的。这个思想具有巨大的优势（至少对于像我这样的实证主义者而言），下一代粒子加速器或者引力的短距离的敏感测量也许可以检验这种思想。这类观测要么可以证伪此理论，要么在实验上证实了其他维的存在。

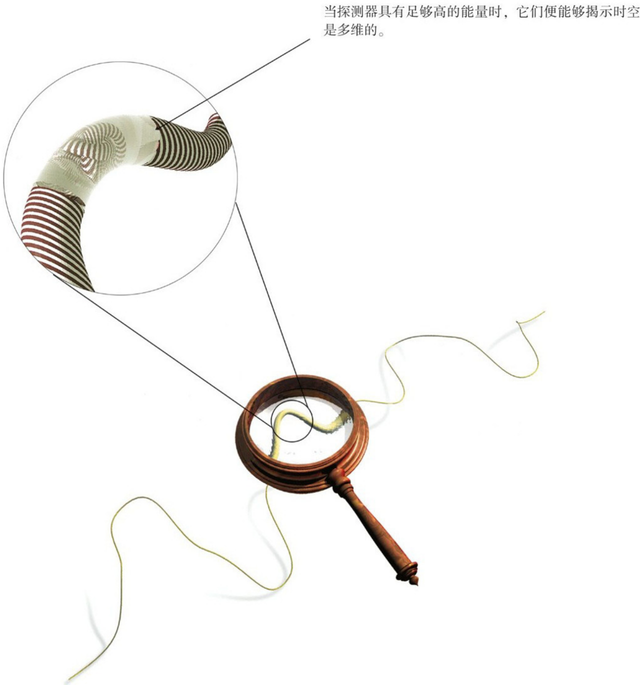


图7.6

一根头发被肉眼看起来像一根线；它仅有的维呈现为长度。类似地，时空让我们看起来显得是四维的，但是当用能量非常高的粒子去探测时，就呈现为十维或十一维的。

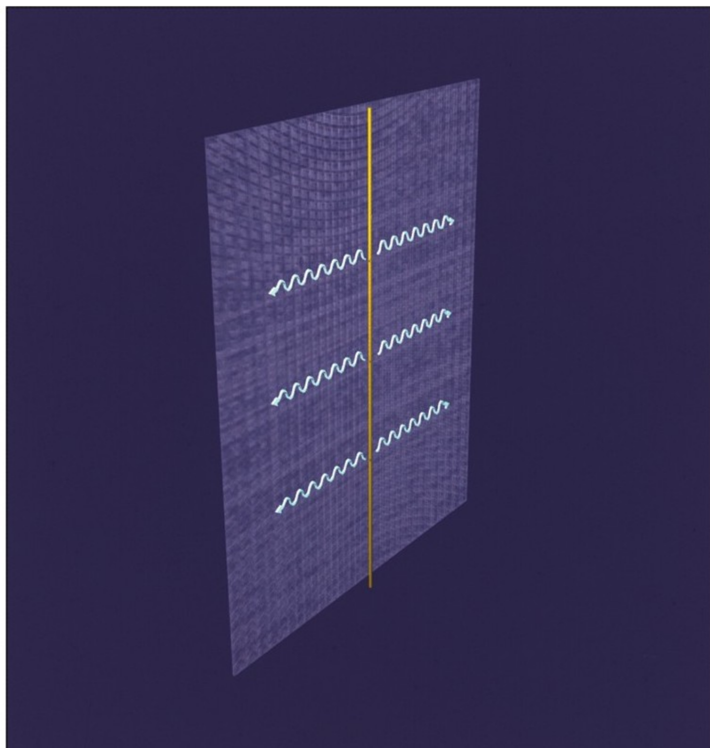


图7.7　膜世界

电力被局限于膜上，而且减小的速率恰好让电子具有围绕原子核公转的稳定轨道。

大的额外维是在我们寻求终极模型或者理论中的激动人心的新进展。它们意味着我们生活在一个膜世界中，一个在高维时空中的四维面或膜。

物质或者像电力这样非引力的力将会被限制在膜上。这样，任何不涉及引力的东西的行为就和在四维中一样。特别是，一个原子的核和围绕它公转的电子之间的电力随距离减小，其下降率刚好使原子稳定，电子不会落入核中（图7.7）。

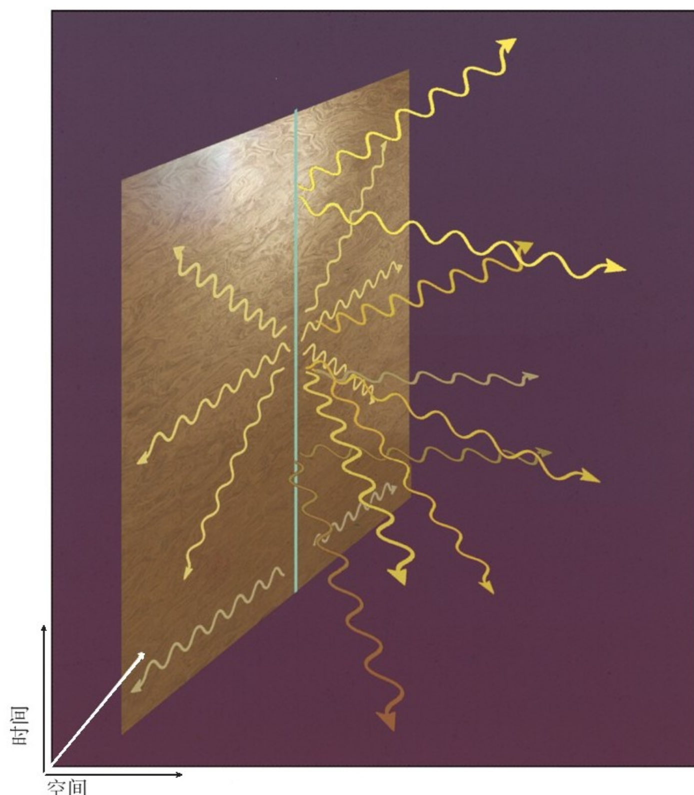


图7.8

引力发散到额外的维中，也沿着膜传递作用，而它随距离衰减得比在四维时更快。

这就和人存原理相一致。人存原理陈述道：宇宙必须适合于智慧生命。如果原子不稳定，我们便不能在此观察宇宙并诘问为何它显得是四维的。

另一方面，弯曲空间所代表的引力会弥漫到高维时空的整体中去。这意味着引力的行为和我们体验的其他力不同：因为引力发散到额外维去，它随距离减小得比我们预料的更快（图7.8）。

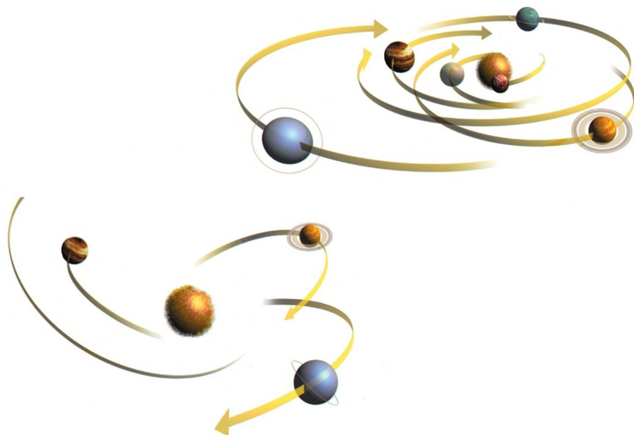


图7.9

引力在大距离下更快的衰减意味着行星轨道是不稳定的。行星要么落进太阳（a），要么完全逃离它的吸引（b）。

如果引力更快速的减小可以延伸到天文的距离，我们就会在行星轨道上觉察到它的效应。事实上，正如在第三章中谈论到的，这些轨道会是不稳定的：行星要么会掉到太阳中去，要么会逃逸到寒冷黑暗的星际空间中去（图7.9）。

然而，如果该额外维在离我们生活其上的膜不远的另一张膜处终结的话，这就不会发生。那么，对于超过两张膜间隔的距离，引力正如电力那样，不能自由地发散开去，而被有效地局限在膜上，并且减小的速率刚好适合于行星轨道（图7.10）。

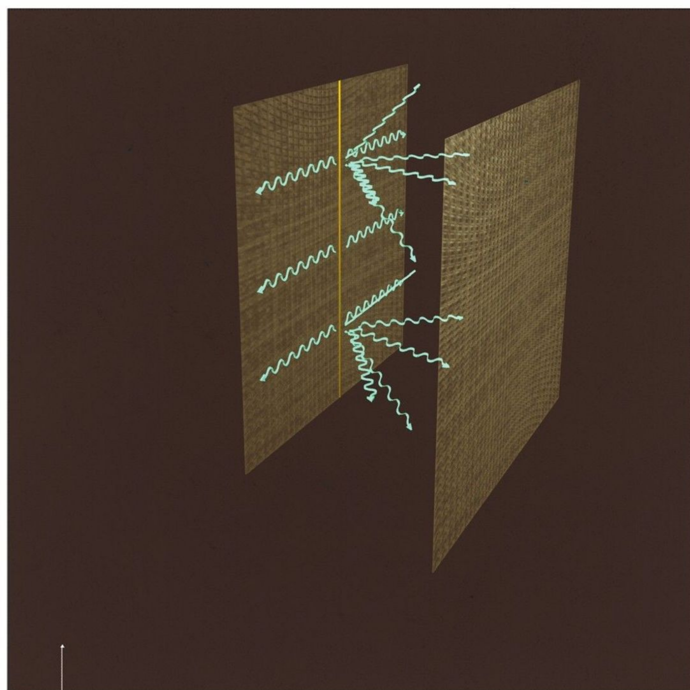


图7.10　邻近我们膜世界的第二张膜会防止引力向额外维的远方发散，而且意味着在比膜间隔更大的距离上，引力衰减的速率和人们在四维情形下预想的一样。

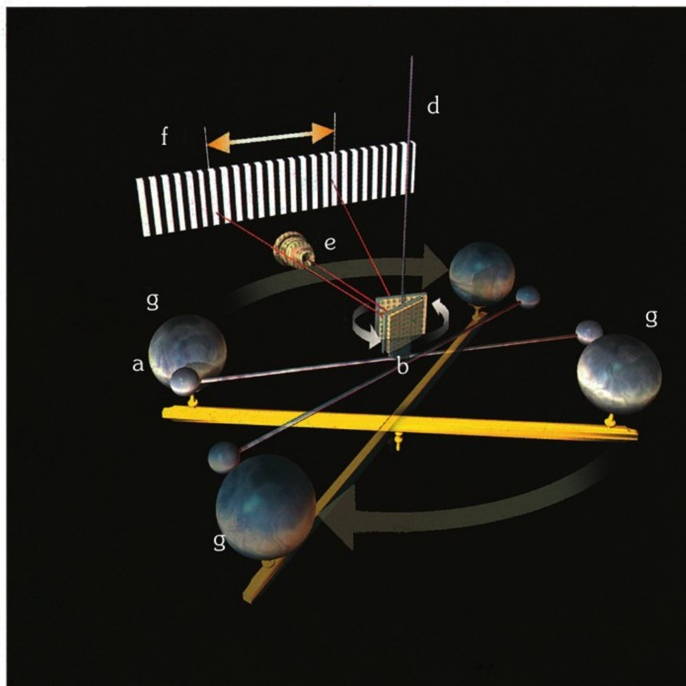


图7.11　卡文迪许实验

一束激光（e）被投射到已刻度的屏幕（f）上确定哑铃的任何扭转。两个小铅球（a）附在哑铃（b）上，哑铃上带有一面小镜子（c），这些都自由地悬挂在扭矩纤维上。

在旋转的杆上的两个大铅球（g）放置在小铅球附近。当大铅球旋转到相反位置，哑铃振动，然后在一个新位置稳定下来。

另一方面，对于短于膜间隔的距离，引力会下降得更快速。在实验室中已经精确地测量到重物体之间的非常小的万有引力，但是迄今实验仍然还没有探测出当膜的间隔小于几毫米时它的效应。现在正进行在更短距离下的新的测量（图7.11）。

在这个膜世界中，我们生活在一张膜上，但是在邻近还有另一张“影子”膜。因为光被限制于膜上，而不能通过它们之间的空间传播，所以我们不能看到影子世界。但是我们会感觉到影子膜上的物质的引力影响。这种引力在我们的膜上会显得是由真正“暗的”源产生的，我们能够检测它们的仅有办法是通过它们的引力（图7.12）。事实上，为了解释恒星围绕着我们星系中心公转的速度，似乎一定存在比我们观察到的物质更多的质量。

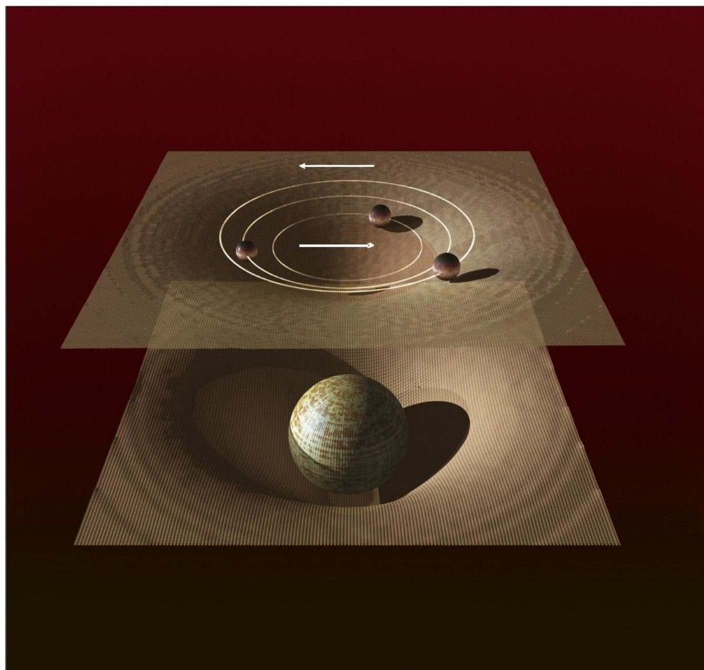
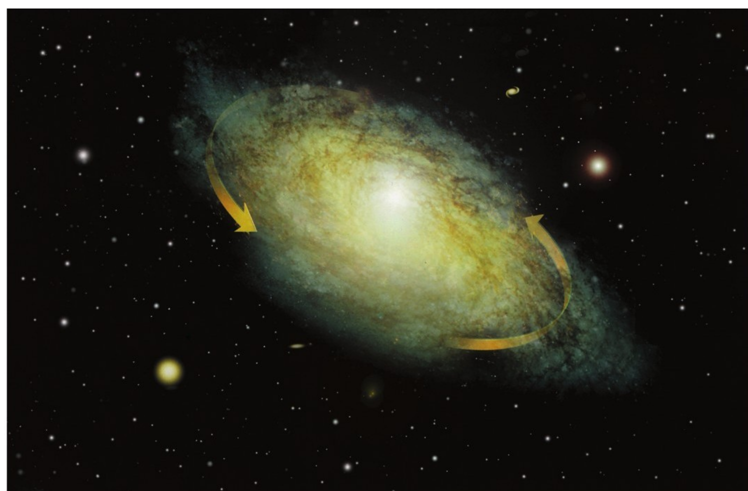


图7.12　在膜世界场景中，由于引力传播到额外的维，行星可以围绕在影子膜上的暗质量公转。

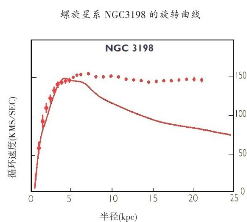


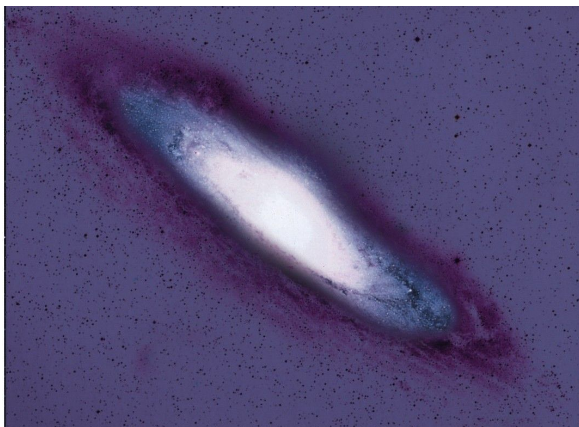
暗物质的证据

各种宇宙学观测强烈地暗示，在我们的星系和其他星系中一定存在比我们看到的多得多的物质。在这些观测中最令人信服的是，像我们自己银河系的螺旋星系其边缘的恒星公转的速度太快了，以至单凭我们观察到的所有恒星的引力吸引不足

以把它约束在轨道上（见对面图）。

从20世纪70年代以来我们就已知道，在螺旋星系的外部区域观察到的恒星旋转速度（由图中的点标明）和从星系的可见恒星分布按牛顿定理预见的公转速度（如图中的曲线标明）之间存在偏差。这个偏差表明，在螺旋星系的外部必须存在多得多的物质。





暗物质的性质

现在宇宙学家相信，螺旋星系的中心部分主要由通常的恒星组成，它们的外围由我们不能直接看到的暗物质主导。但是，现在的一个基本问题是，去发现在星系的这些外围的暗物质的主导形式的性质。在20世纪80年代之前，人们通常假定这种暗物质是由质子、中子和电子组成的平常物质，它们处于某种不易检测的形式：也许是气体云，或者MACHO-“重质量的致密晕状物体”，就像白矮星或者中子星，甚至黑洞。

然而，星系形成的现代研究使宇宙学家们相信，暗物质中的可观的部分必须具有和平常物质不同的形式。也许它是由诸如轴子或者中微子之类的非常轻的基本粒子的质量引起的。它甚至可由更奇异的粒子种类，例如WIMP-“弱相互作用有质量粒子”构成。现代基本粒子理论预言WIMP，但它们还没被实验检测到。

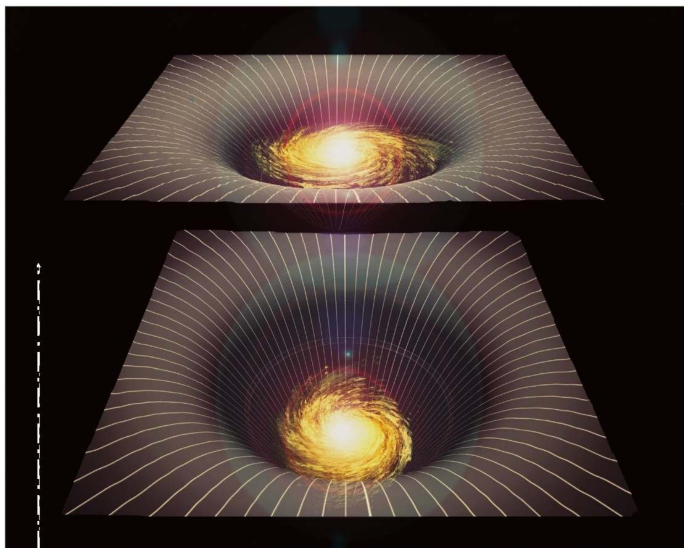


图7.13

因为光不能通过额外维传播，所以我们看不见影子膜上的影子星系；但是引力可以通过额外维传播，因此我们星系的旋转便要受到暗物质，即我们不能看见的物质的影响。

这种下落不明的物质也许是在我们世界中某些奇异的粒子种类，诸如WIMP（弱相互作用重粒子）或者轴子（非常轻的基本粒子）。但是，下落不明的质量也可以是影子世界以及其中的物质存在的证据。也许它包含影子人类，而影子人类在努力解释影子恒星围绕着影子星系中心公转时，极想知道在他们世界中似乎下落不明的物质（图7.13）。

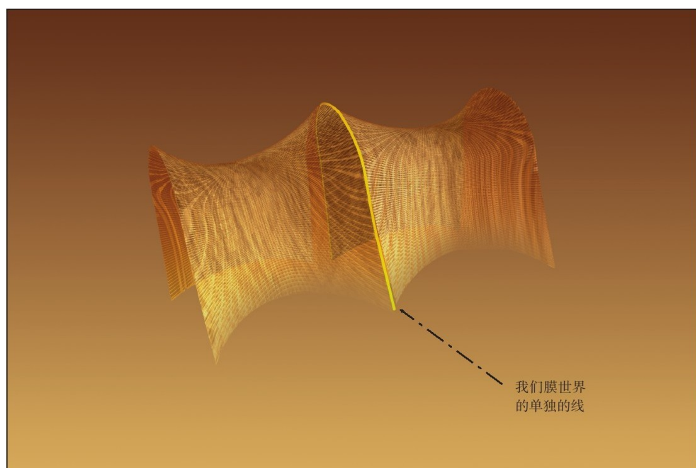


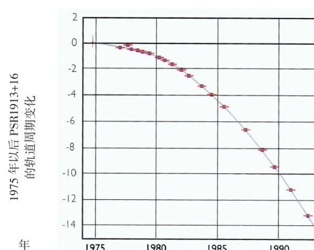
图7.14

在朗达尔-桑德鲁姆模型中只存在一片膜（在这里只画出一维）。额外维延伸到无限远，但是被弯曲得像一片马鞍面。这种曲率防止膜上物质的引力场发散到额外维的深处。

如果额外维不在第二张膜上终结，另一种可能性是它们是无限的，但是高度弯曲的，正如一个马鞍面（图7.14）。丽莎·朗达尔和拉曼·桑德鲁姆指出，这类曲率的行为和第二张膜颇为相像：一个物体在膜上的引力影响被局限在膜的小邻域中，而且不会发散到额外维的无限远去。正如在影子膜模型中那样，引力场在长距离下的恰当的下降可以解释行星公转和在实验室中的引力的测量，但是引力在短距离下会变化得更厉害。



两个致密的中子星彼此相对地向内做螺旋运动



1975 年以后双脉冲星PSR1913+16 的图线

双脉冲星

广义相对论预言，在引力影响下运动的重物发射引力波。引力波像光波一样，从发射它们的物体携带走能量。然而，通常能量损失的速率极低，因此观察它非常困难。例如，引力波发射使地球慢慢地朝着太阳做螺旋运动，但是它们需要再过1027年才能碰撞！

但是，1975年罗素·荷尔西和约瑟夫·泰勒发现了双脉冲星PSR1913+16，这是由两个致密中子星组成的系统。它们相互公转，其最大的间距只有一个太阳半径。根据广义相对论，其快速运动意味着，因为这个系统发射强大的引力波信号，它的轨道周期应该在短得多的时间尺度下减小。广义相对论预言的变化与荷尔西和泰勒对轨道参数的仔细观测极其完美地符合。他们的观测指出，从1975年以来该周期缩短了10多秒。1993年他们因为这个广义相对论的验证而获得诺贝尔奖。

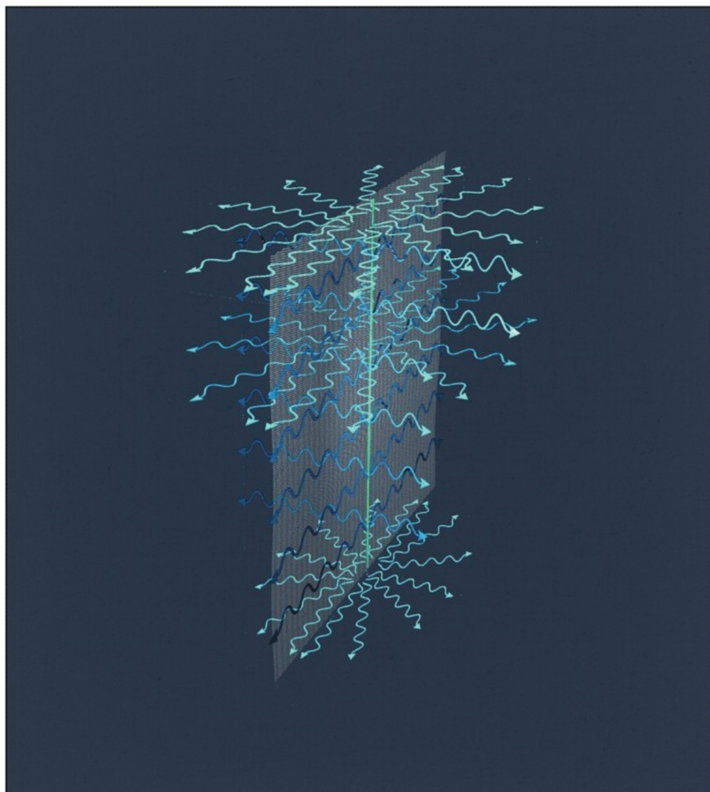


图7.15

在朗达尔-桑德鲁姆模型中短波长引力波能从膜上的源将能量携带走，导致在表观上违反能量守恒定律。

然而，在朗达尔-桑德鲁姆模型和影子膜模型之间存在一个重要的差别。在引力影响下运动的物体产生引力波，即曲率的涟漪，它以光速在时空中传播。正如光的电磁波，引力波应携带能量，对双脉冲星PSR1913＋16的观测已经证实了这个预言。

如果我们确实生活在具有额外维的时空中的一张膜上，由膜上的物体运动产生的引力波会传播进其他维去。如果还存在第二张影子膜它们就会被反射回来并且被束缚在两张膜之间。另一方面，如果只有一张单一的膜，而且额外维正如在朗达尔-桑德鲁姆模型中那样，无限地延伸出去，引力波将完全逃逸，并且从我们的膜世界携带走能量（图7.15）。

这似乎违反了物理学中的一个基本原则：能量守恒定律，即宇宙中的总能量保持常数。不过，这只是因为我们的观点局限于在膜上发生的事，所以定律显得被违反了。一个可以看到额外维的天使知悉总能量并

没有改变而只不过发散得更开而已。

由两个相互公转的恒星产生的引力波具有的波长比在额外维中的马鞍形曲率的半径长得多。这意味着，波正如引力那样被局限于膜的很小邻域内，而不向额外维发散很多或者不从膜携带走很多能量。另一方面，波长比额外维被弯曲的尺度更短的引力波会很容易地从膜的邻近逃逸。

黑洞很可能是可观数量的短引力波的仅有的源。一个在膜上的黑洞会延展到在额外维中的一个黑洞去。如果该黑洞很小，它将几乎是圆的；也就是说，它向额外维延展的深度和它在膜上的尺度大致相当。另一方面，一个膜上的巨大黑洞将会延展成一个“黑饼”，它被局限于膜的邻近，而且它在额外维上的厚度比在膜上的宽度小很多（图7.16）。

正如在第四章中解释的，量子理论意味着黑洞不是完全黑；它们像热体一样发射所有种类的粒子和辐射。因为物质和非引力的力像电力一样被限制在膜上，所以粒子和辐射，譬如光，将会沿着膜发射。然而，黑洞还发射引力波。这些引力波不被限制在膜上，也传播到额外维中去。如果黑洞是巨大的并且是饼状的，引力波就会停留在膜附近。这表明黑洞将会以我们在四维时空中预料的速率损失能量（按照$E=mc^2$，因此损失质量）。因此，黑洞会慢慢蒸发并且缩小尺度，直至它变得比马鞍面形额外维的曲率半径还小为止。在这一刻由黑洞发出的引力波开始自由地逃逸到额外维中去。对于膜上的某一个人，黑洞——或者如米歇尔称作暗星的（见第四章）——就显得在发射暗辐射，这是一种在膜上不能直接观察到的辐射，但是其存在可由黑洞损失质量这一事实推断出。

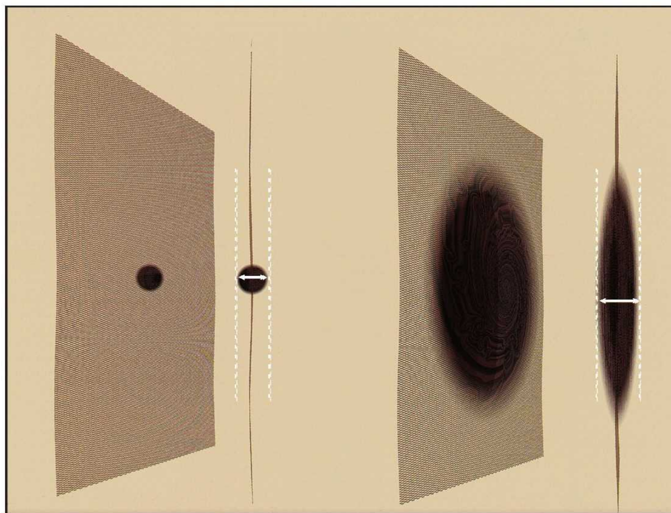


图7.16

在我们膜世界中的一个黑洞会延展到额外维中去。如果黑洞很小，它就几乎是球状的。但是在膜上的一个巨大黑洞会在额外维中延展成一个饼状的黑洞。

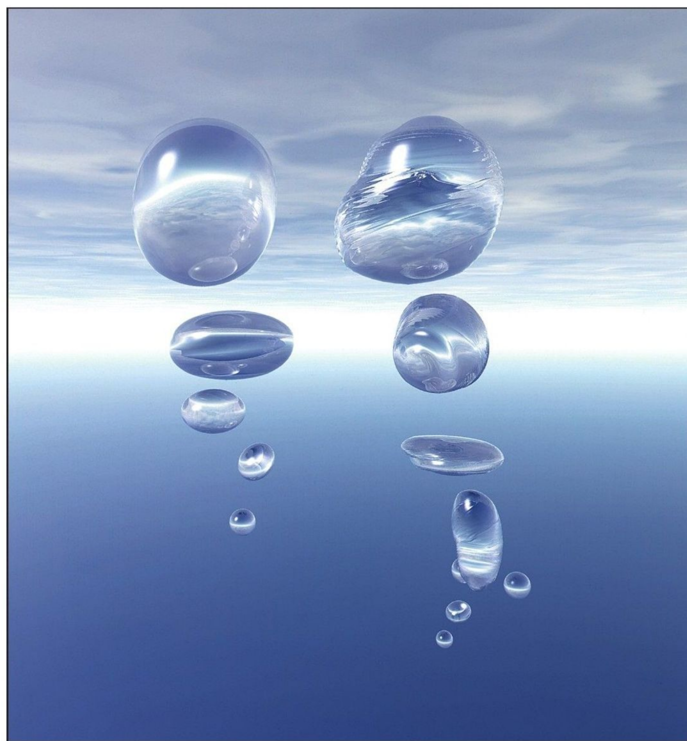


图7.17　膜世界的形成就像在沸腾水中蒸汽泡的形成一样。

这意味着从一个蒸发着的黑洞发出的最后辐射暴显得比它实际上的较弱。这也许是为什么我们还未观察到能被归因于正在死亡的黑洞的伽马射线暴的原因，虽然另外一种更平淡的解释是，不存在那么多的黑洞，其质量低到使之不迟于宇宙演化的这一阶段蒸发。

从膜世界黑洞来的辐射起因于在和不在膜上的粒子的量子涨落，但是膜，正如宇宙中的任何其他东西一样，自身也遭受到量子涨落。这些涨落会使膜自发地出现和消失。膜的量子创生有点像在沸腾的水中蒸汽泡的形成。液态水由亿亿个挤在一起的H2O分子组成，在最邻近的分子之间相互耦合。当水被加热上去，分子运动得更快，并且相互弹开。这些碰撞会偶然地赋予分子这么高的速度，一群分子会从它们的键中解脱出来，并且形成由水环绕着的小蒸汽泡。随着更多的分子从液体中出来加入蒸汽或者相反的过程，泡会以随机的方式胀大或缩小。大多数蒸汽泡会再次坍缩成液体，但是一些将会胀大到一定的临界尺度，超过这临界尺度的泡泡几乎肯定会继续胀大。当水沸腾时人们看到的正是这些大的膨胀的泡泡（图7.17）。

膜世界的行为很相似。不确定性原理允许膜世界作为泡泡从无中出现，膜形成泡泡的表面，而内部是高维空间。非常小的泡泡倾向于再坍缩成无，但是一个由于量子涨落而胀大超过某一临界尺度的泡泡多半会继续胀大。生活在这膜上，也就是泡泡的表面上的（就像我们这样的）人，会认为宇宙正在膨胀。这正如把星系画在气球的表面上，然后将其吹胀。星系会相互离开，但是没有任何星系可以被认定为膨胀的中心。但愿没有人持宇宙之针将泡泡放气。



根据在第三章中描述的无边界设想，膜世界的自发创生有一个在虚时间中的历史，这个历史像一个果壳：也就是说，它是一个四维球面，正如地球的表面，但是多了两维。其重要的差别是在第三章中描述的果壳根本上是空的。该四维球不是任何东西的边界，而M理论预言的时空其余的六维或七维都被弯卷得甚至比果壳还小。然而，在这新的膜世界

图像中，该果壳是充满了的：我们生活其上的膜在虚时间中的历史是一个四维球，它是一个五维泡泡的边界，而余下的五维或六维被弯卷得非常小（图7.18）。

膜在虚时间中的历史确定了它在实时间中的历史。在实时间中膜以像在第三章中描写过的加速暴胀的方式膨胀。一个完全光滑的球形的果壳是泡泡在虚时间中的最可能的历史。然而，它对应于在实时间内以暴胀方式永远膨胀的膜。星系不能在这种膜中形成，这样智慧生命不会发展。另一方面，在虚时间中，不那么光滑和球形的历史具有稍低的概率，但是它能对应于膜在实时间中首先有一加速暴胀的相，然而接着开始缓慢下来的行为。在这个减速膨胀过程中，星系应能形成，而且智慧生命应能发展。这样，根据第三章阐述的人存原理，诘问为何宇宙的起源不是完全光滑的智慧生命只能观察到稍微长毛的果壳。

随着膜的膨胀，在它内部的高维空间的体积会增大。



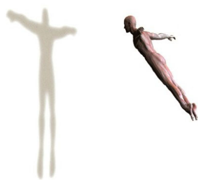
图7.18　宇宙起源的膜世界图象和第三章讨论的不同，因为稍变平坦的四维球面或者果壳不再是空心的，而且被第五维充满。



全息学

全息学把一个空间区域的信息编码到一个低一维的面上。一个黑洞的事件视界的面积是它的内部状态数的测度这一事实显示，全息原理似乎是引力的一个性质。在膜世界模型中，全息术是在我们四维世界的态和高维的态之间的一一对应。从实证主义的观点看，人们不能区分何种描述更为基本。

最终存在一个由我们生存其上的膜围绕着的巨大的泡泡。但是，我们真的是生活在膜上吗？根据第二章阐述的全息学观念，关于发生在时空的一个区域内的一切的信息可以被编码在边界上。这样，也许因为我们是发生在泡泡内部的东西在膜上的投影，所以我们自以为是生活在四维的世界中。



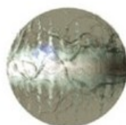
然而，从实证主义的观点，我们不能问什么才是实体，是膜还是泡泡？两者都是描述观测的数学模型。我们可以随意使用这两个模型，哪个方便就使用哪个。膜的外面是什么呢？存在着几种可能性（图7.19）：

1.外面可能没有任何东西。虽然蒸汽泡的外面是水，这只不过是帮助我们摹想宇宙起源的一个比喻。人们可以想象一个数学模型，它仅仅是一张膜以及内部的高维空间，但是外部是绝对的无，甚至连空的空间也没有。人们可以不理外面是什么而计算该数学模型预言的东西。

2.人们可以拥有一个数学模型。在该模型中一个泡泡的外面被黏到一个类似的泡泡的外面。这个模型实质上在数学上和上面讨论的等同——在泡泡外面没有任何东西——除了心理上的差别：人们觉得处于时空的中心比处于它的边缘更快乐。然而，对于一名实证主义者，可能性1和可能性2是相同的。

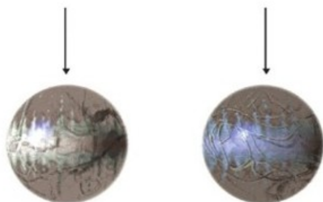
3.泡泡也许会膨胀进入一个空间，该空间不是泡泡内部空间的镜像。这种可能性和上述讨论的两种不同，它更像沸腾的水的情形。其他的泡泡会形成并且膨胀。如果它们和我们在其中生活的泡泡碰撞并合并，其结果将会是灾难性的。甚至有人已经提出，大爆炸本身也许是由膜之间的碰撞产生的。

类似这样的膜世界模型是研究的热门论题。虽然它们是高度猜测性的，但是它们提供的新的行为方式可被观测所验证。它们可以解释为何引力显得如此之弱。在基本理论中引力也许相当强，但是引力在额外维中的发散意味着，引力在我们生活其上的膜中在大距离下变成弱的。

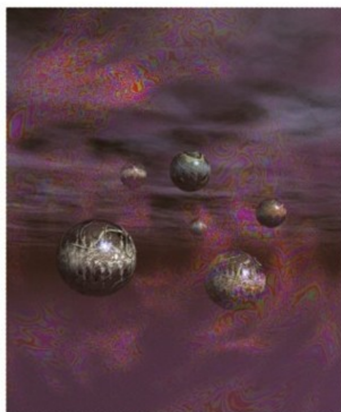


1. 一个内部为高维空间外部为无的膜/泡。

等同



2. 一种可能性是一个膜/泡的外面和另一个泡的外面黏在一起。



3. 一个膜/泡向不在它内部的镜像空间中膨胀。在这种场景中其他泡能形成并且膨胀。

图7.19

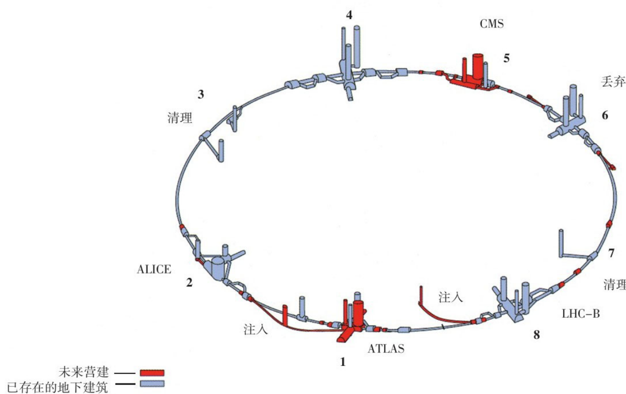


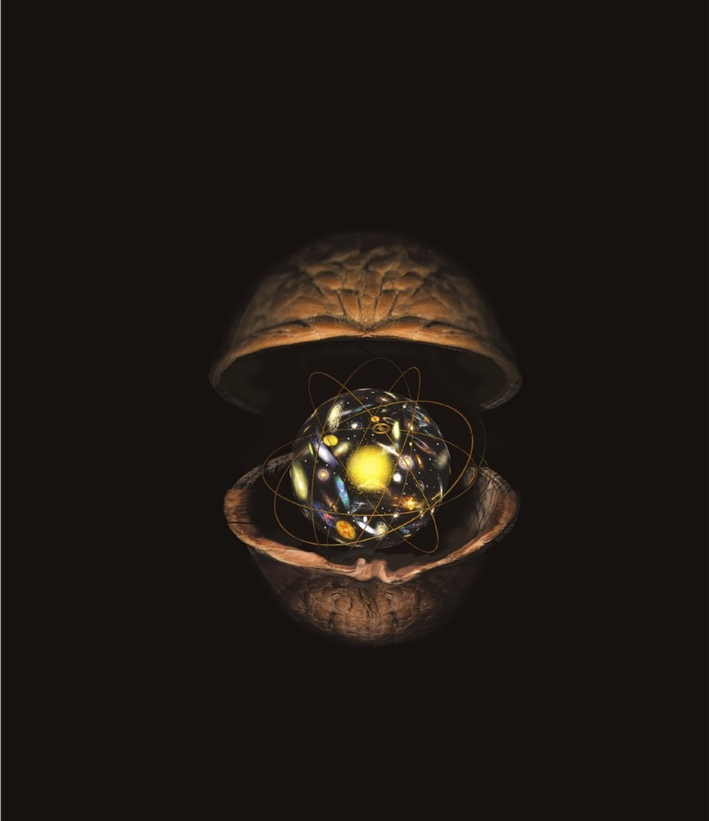
图7.20

LEP隧道的设计显示瑞士日内瓦的大型强子碰撞机（LHC）已有的基本设施和未来的营建。

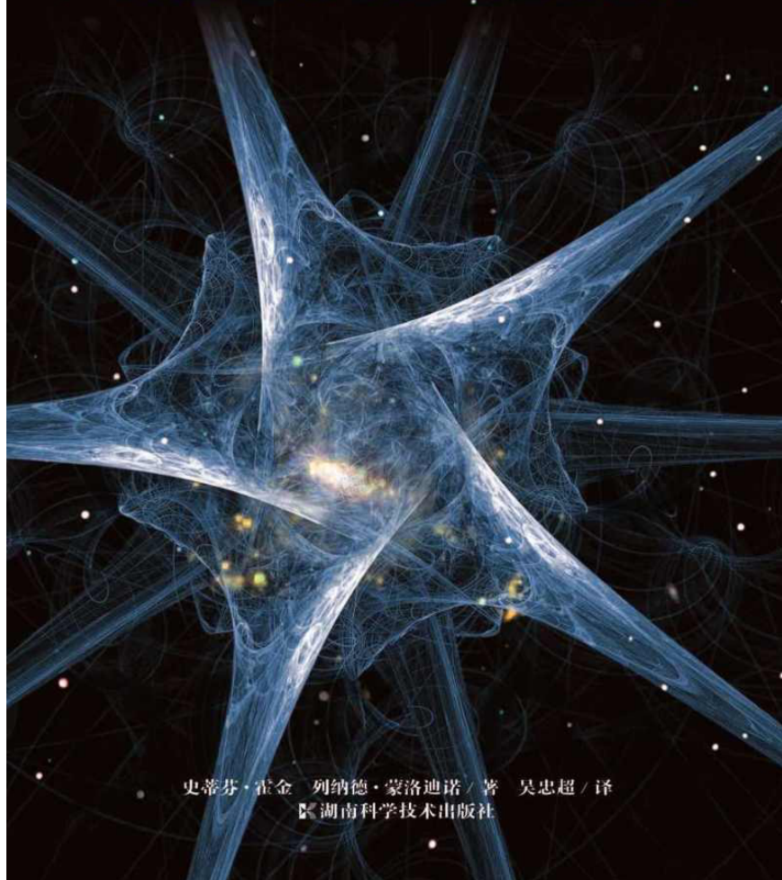
其中一个后果是：普朗克长度，也就是我们可以探测而不必创生黑洞的最小距离，会比在我们四维膜上因引力的微弱性而呈现的要大很多。最小的俄罗斯娃娃毕竟没有这么小；它很可能是未来的粒子加速器可以达到的。实际上，如果美国不在1994年忽然觉得建造SSC（超导超级碰撞机）过于昂贵，甚至在已经建造一半的情形下，取消了这个计划的话，我们本来早就可以发现这个最小的娃娃，也就是基本的普朗克长度了。其他的诸如日内瓦LHC（大型强子碰撞机）之类的粒子加速器现在正在建造（图7.20）。利用这些和诸如宇宙微波背景辐射的其他观测，我们也许可能确定，我们是否生活在膜上。如果这样的话，它大概是由于人存原理从M理论允许的大量的宇宙中挑出的膜模型。我们可以把莎士比亚《暴风雨》中的米兰达的唱段很好地释义为：

呵，膜的新奇世界，
里面有这样美妙的生灵。

那就是果壳中的宇宙。



[1]李白在《庐山谣寄卢侍御虚舟》诗中写道：“庐山秀出南斗旁，屏风九叠云锦张，影落明湖青黛光。”九叠屏即李白书堂所在地。


大设计
THE GRAND DESIGN
史蒂芬·霍金　列纳德·蒙洛迪诺／著　吴忠超／译
湖南科学技术出版社

版权信息

图书在版编目（CIP）数据

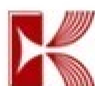
大设计/（英）霍金，（英）蒙洛迪诺著；吴忠超译.——长沙：湖南科学技术出版社，2011.1
ISBN 978-7-5357-6544-4
I.①大… II.①霍……②蒙……③吴… III.①科学知识-普及读物
IV.①Z228
中国版本图书馆CIP数据核字（2010）第239455号

THE GRAND DESIGN by Stephen Hawking and Leonard Mlodinow
（Copyright notice exactly as in Proprietor's edition）
Simplified Chinese translation copyright©2011 by Hunan Science & Technology Press
Published by arrangement with Writers House, LLC
ALL RIGHTS RESERVED
湖南科学技术出版社获得本书中文简体版中国内地独家出版发行权。
版权登记号：18-2007-087

大设计

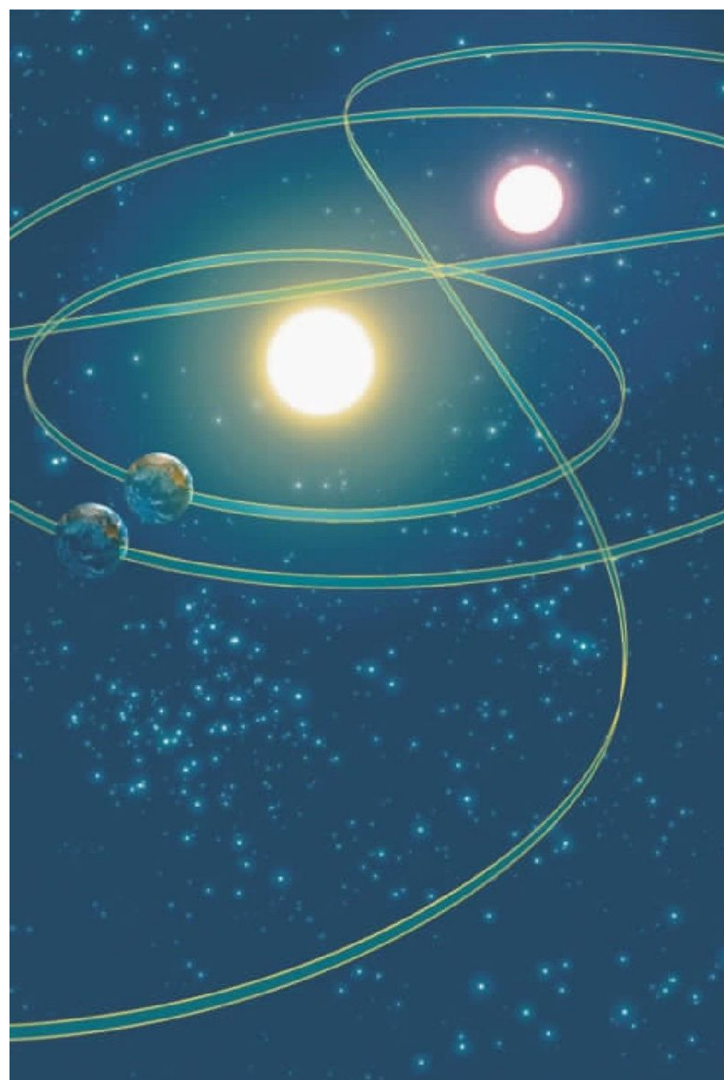
著者：史蒂芬·霍金列纳德·蒙洛迪诺
译者：吴忠超
策划编辑：孙桂均李媛
文字编辑：陈一心
出版发行：湖南科学技术出版社
社址：长沙市湘雅路276号
http://www.hnstp.com
邮购联系：本社直销科0731-84375808
印刷：湖南新华印刷集团有限责任公司（长沙）
（印装质量问题请直接与本厂联系）
厂址：湖南望城·湖南出版科技园
邮编：410219
出版日期：2011年1月第1版第1次
开本：950mm×640mm1/16

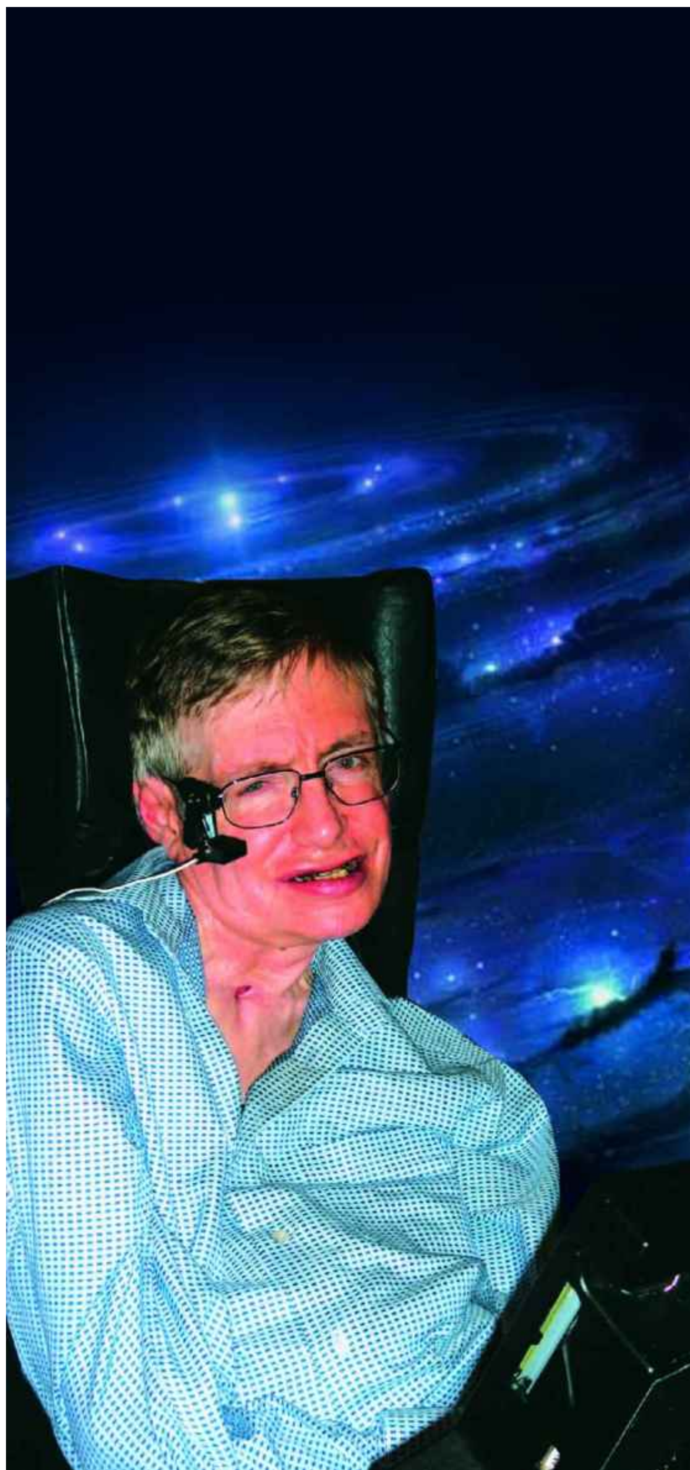
印张：11
插页：4
书号：ISBN978-7-5357-6544-4
定价：48.00元
（版权所有·翻印必究）



目录

版权信息
译者序
第一章 存在之谜
第二章 定律制约
第三章 何为实在
第四章 可择历史
第五章 万物理论
第六章 选择宇宙
第七章 表观奇迹
第八章 伟大设计
小辞典
感谢





史蒂芬·霍金的其他著作

时间简史——从大爆炸到黑洞

时间简史（普及版）

霍金讲演录（黑洞、婴儿宇宙及其他）

时间简史（插图版）

果壳中的宇宙

童书

乔治的宇宙：秘密钥匙（与露西·霍金合著）

乔治的宇宙：寻宝记（与露西·霍金合著）

乔治的宇宙：大爆炸（与露西·霍金合著）

列纳德·蒙洛迪诺的其他著作

时间简史（普及版）

醉汉的脚步：随机性如何主宰我们的生活

欧几里得的窗口：从平行线到超曲面的几何故事

费恩曼的彩虹：在物理和生活中寻找美

童书

最后的恐龙（与马修·科斯特洛合著）

泰坦尼克猫（与马修·科斯特洛合著）

译者序

《大设计》是霍金在其《时间简史》之后最重要的著作。这本书的主题是理解生命、万物和宇宙的存在。它凝结了作者自《时间简史》出版之后20多年间，对科学和哲学的探索成果，以及对这些学科的未来展望。这本书是蒙洛迪诺协助完成的。

由于近现代科学尤其是量子论的发展，哲学界已不可能跟得上科学的脚步。当今不存在像康德、庞加莱和罗素这样的人物。近30年前霍金提出了量子宇宙学的无中生有的场景，其后有识之士一直追问，为何是有非无？宇宙何以存在？我们何以存在？

人类花费了几千年才从神话的朦胧走向理性的澄明。智慧生命逐渐意识到，宇宙整体及其万物是由规律制约的。这种决定论的观点似乎使自由意志无容身之处。幸亏对于极为复杂的系统，人们可以也必须采用有效模型。比如，心理学就是对于人体的有效模型，而自由意志可被镶嵌其中，从此诗意栖居世间，情感抚慰人心，艺术之花绽放。

霍金认为实在不过是一套自洽的和观测对应的图景、模型或者理论。霍金将其称为依赖模型的实在论。如果两种图景满足同样的条件，你就不能讲哪种更实在些，你觉得哪种更方便就用哪种。如果没有一种理论满足这些条件，那么宇宙就消失了。自在之物在这里是多余的。这样，科学甚至数学研究既可看成发现，又可看成发明，由此澄清了许多研究者似非而是的迷惑。这种新观点还使科学和哲学中的许多长期争论的问题成为伪问题。

宇宙和万物的演化不只经历一个历史，它们经历所有可能的历史。费恩曼的量子论的历史求和表述与依赖模型的实在论相协调，而与旧实在论相抵触。量子论只有在经典的近似范围才和旧实在论协调。惠勒把这些观点应用于宇宙尺度，于是因果的差异就消失了。过去和将来一样不是被确定的。

人类从蒙昧走向文明是一部伟大的史诗：牛顿的经典力学、法拉第和麦克斯韦的电磁学、爱因斯坦的相对论、量子论、弱电理论、色动力

学、大爆炸模型、无边界设想、超引力、超弦，直至迄今终极理论的唯一候选者——M理论。M理论中的时空是十一维的，当其中七维蜷缩成内空间后，留下各种四维时空及其表观定律。

M理论可以在无边界宇宙的框架中预言众多不同的宇宙及其表观定律，但只有极少数适合我们的存在。在观察者存在的条件下，寻求最大概率的无边界解便得到我们宇宙的历史。观察者作为某种意义上的万物之灵参与创造不仅将来的而且过去的历史。

正是因为这样，由我们的存在条件导出的结论和从表观定律导出的相一致。宇宙似乎特别宠爱观察者。这激起了斯宾诺莎、爱因斯坦和千千万万探索者的宇宙宗教情感。

宇宙中的凝聚物的能量被引力势能平衡，所以宇宙的总能量为零，由此万物不能无中生有，而宇宙却能。真正的太初黑洞必须让宇宙携带其同步才能创生。如果M理论最后被接受为终极理论，那我们就寻找到了大设计。

2006年夏天霍金第三次访问中国，并于6月21日在北京举行记者招待会。为了避免记者提问的无聊和空泛，我为之代拟问题，其中包括下面这一道。

问：“你能对宇宙和我们自身的存在作些评论吗？”

答：“根据实证主义哲学，宇宙之所以存在是因为存在一个描述它的协调的理论。我们正在寻求这个理论。但愿我们能找到它。因为没有一个理论，宇宙就会消失。”

这恰巧是本书的主旨，本书正是对他回答的圆满阐述。由此可见，他在本书表达的思想早在2006年夏天就已经相当清晰了。

我们似乎处于科学新变革的前夜，这个变革将和哲学的变革同时到来。

吴忠超

2010年8月26日杭州望湖楼

第一章　存在之谜

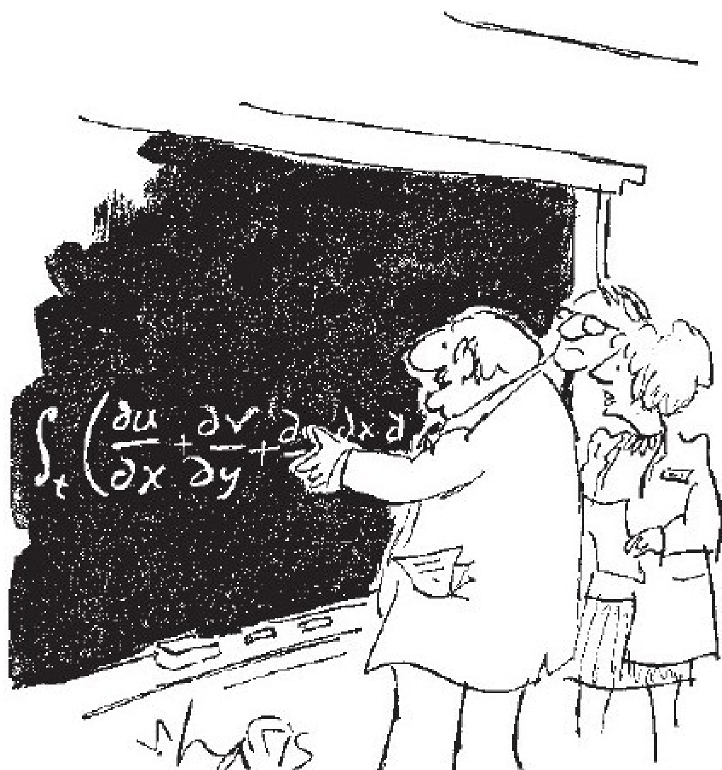


我们个人存在的时间都极为短暂，其间只能探索整个宇宙的小部分。但人类是好奇的族类。我们惊讶，我们寻求答案。生活在这一广阔的、时而亲切时而残酷的世界中，人们仰望浩渺的星空，不断地提出一长串问题：我们怎么能理解我们处于其中的世界呢？宇宙如何运行？什么是实在的本性？所有这一切从何而来？宇宙需要一个造物主吗？我们中的多数人在大部分时间里不为这些问题烦恼，但是我们几乎每个人有

时都会为这些问题所困扰。

按照传统，这是些哲学要回答的问题，但哲学死了。哲学跟不上科学，特别是物理学现代发展的步伐。在我们探索知识的旅程中，科学家已成为火炬手。本书的目的是给出由最近发现和理论进展所提示的答案。它们把我们引向宇宙以及我们在其中的位置的最新图像，这种图像和传统的，甚至与仅一二十年前我们画出的图像都大相径庭。尽管如此，新概念的最初梗概几乎可以追溯到一个世纪之前。

根据宇宙的传统观念，物体沿着明确定义的途径运动，而且具有确定的历史。我们能够指定其每一时刻的确切位置。尽管对于日常的目的这种描述已是足够成功，但在1920年代，人们发现，这种“经典”图像不能解释在原子和亚原子的存在尺度下观察到的似乎奇异的行为，而必须采用一种称为量子物理的不同的框架。结果发现在预言那种尺度的事件时，量子物理特别精确，而且在应用于日常生活的宏观世界时，还重复了旧的经典理论的预言。然而，量子物理和经典物理乃是基于物理实在的非常不同的观念之上。

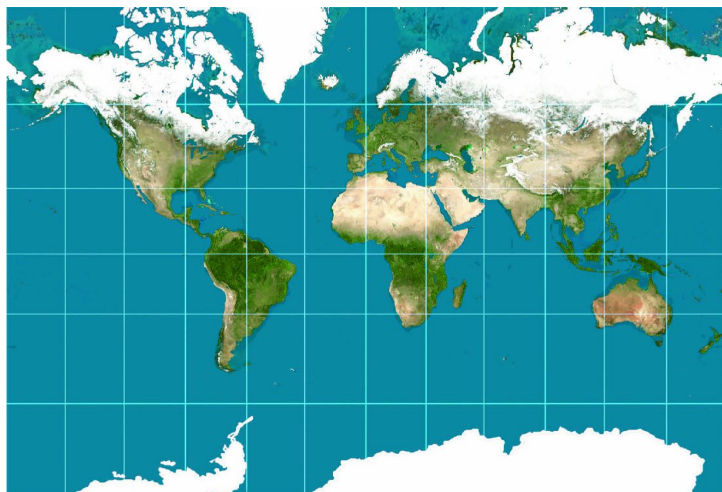


“……而那是我的哲学。”

量子论可以用许多不同方式来表述，但是理查德·费恩曼给出的表述大概是最直观的。他是一位多姿多彩的人物，在加州理工学院工作，并在不远处的脱衣舞厅作鼓手。按照费恩曼的说法，一个系统不仅具有一个历史，而且具有每种可能的历史。在寻求答案的时候，我们将仔细地解释费恩曼的方法，并使用它来探讨这种思想，即宇宙的本身并没有单一的历史，甚至也没有悠然独立的存在。这听起来似乎是激进的思想，甚至对于许多物理学家而言也是如此。的确，正如当今科学中的许多概念一样，它似乎违反常识。但是常识是基于日常经验之上，而非基于通过一些无比美妙的技术被揭示的宇宙之上，这些技术中有一部分使我们得以深入窥探原子或者观测早期宇宙。

直至现代物理的出现，一般认为有关世界的一切知识都可以通过直接观测而获取。事物就是它们看起来的样子，正如通过我们的感官而觉察到的。但是现代物理的辉煌的成功显示，情况并非如此。现代物理是基于诸如费恩曼的与日常经验相抵触的概念之上。因此，实在的幼稚观点和现代物理不相容。为了对付这样的矛盾，我们将采用一种称为依赖模型的实在论的方法。它是基于这样的观念，即我们的头脑以构造某种世界模型来解释来自感官的输入。当这样的模型成功地解释事件时，我们就倾向于将实在性或绝对真理的品格赋予它，也赋予组成它的元素和概念。但是在为同样的物理场景作模型时，也许存在不同方法，每种方法使用不同的基本元素和概念。如果两个这样的物理理论或模型都精确地预言同样事件，人们就不能讲一个模型比另一个更真实；说得更确切点，哪个模型更方便我们就随意地使用哪个。

在科学史上，从柏拉图到牛顿的经典理论，再到现代量子理论，我们发现了一系列越来越好的理论和模型。人们很自然地询问：这个系列最后会终结于一个将包括所有的力并能预言所有对宇宙观测的终极理论吗？或者我们将永远寻求越来越好的理论，但永远找不到不能再改善的那个？我们对这个问题尚无确定答案。但是如果确实存在一个万物终极理论的话，我们现在就已拥有了一个称作M理论的候选者。M理论是拥有我们认为最后理论所应具备的所有性质的仅有模型，而在下面的讨论中，我们将大量地以之为基础的正是这个理论。



世界地图

需用一系列相互交叠的理论去描述宇宙，正如需用相互交叠的地图去描述地球一样。

M理论不是通常意义上的一种理论。它是整个一族不同的理论，其中的每一种只在物理场景的某一范围很好地描述观测。它有点像地图。众所周知，人们用一单张地图不能展现地球的整个表面。通常应用于世界地图的麦卡脱投影使遥远的北方和南方的面积显得越来越大，而且不覆盖北南两极。为了如实地绘制整个地球的地图，人们必须利用一组地图，每一张地图覆盖有限的范围。这些地图相互交叠，在交叠处，它们展现相同的风景。M理论与之类似。M理论族中的不同理论可显得非常不同，但它们都可认为是同一基本理论的一个方面。它们是基本理论的一些只适用于有限范围的版本——例如在能量这样的量的很小范围。正如麦卡脱投影中交叠的地图，在不同版本交叠之处，它们预言相同的现象。然而，正如不存在很好地描绘整个地球表面的平坦地图一样，也不存在很好地描绘在一切情形下观测的单一理论。

我们将要描述M理论如何可能为创生问题提供答案。根据M理论，我们的宇宙不是仅有的宇宙。相反地，M理论预言，众多的宇宙从无中创生。它们的创生不需要某种超自然的存在或上帝的干预。毋宁说，这些多重宇宙从物理定律自然地发生。它们是科学所预言的。每个宇宙在后来，也就是说，在像现在这个时刻，即在它创生许久之后，具有许多可能的历史和可能的状态。这些状态中的大多数完全不像我们观察到的宇宙，完全不适宜于任何生命形式的存在。只有非常少的一些可让我们这样的生物存在。因而，我们的存在从这个大量集合中只选取出那些和我们的存在相协调的宇宙。尽管在宇宙的尺度下，我们是弱小和微不足

道的，然而这使我们在某种意义上成为造物主。

为了最深入地理解宇宙，我们不仅需要知道宇宙是如何行为的，还需要知道为何。

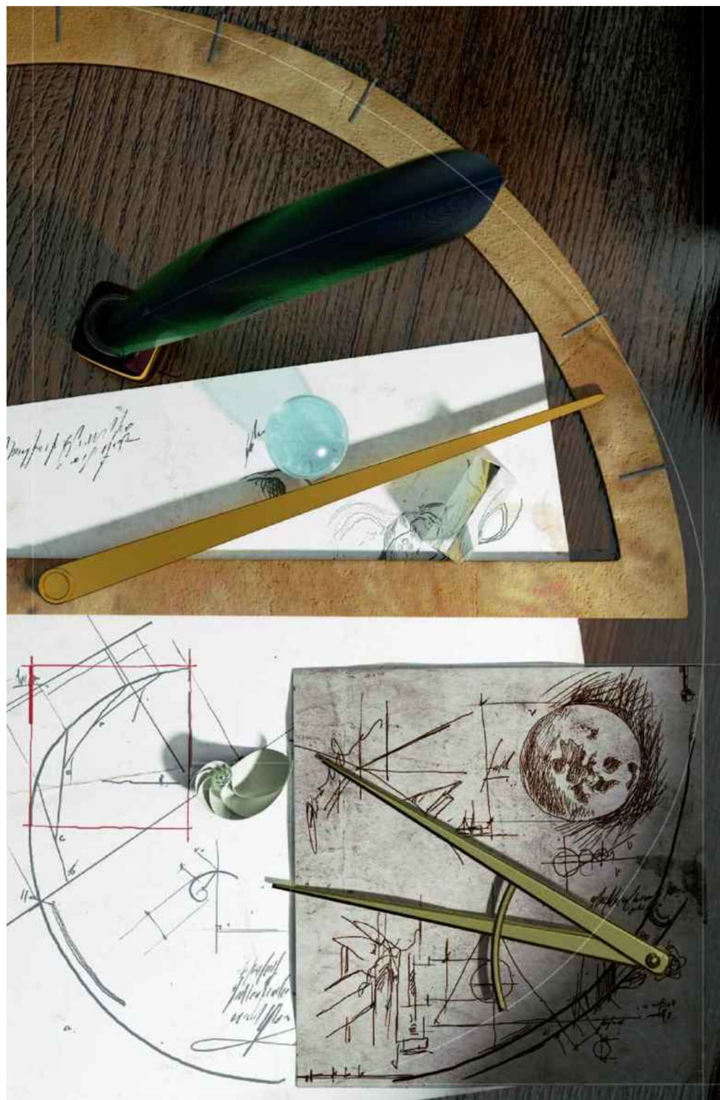
为什么存在实在之物，而非一无所有？

我们为什么存在？

为什么是这一族特殊的定律而非别的？

这是生命、宇宙和万物的终极问题。我们将试图在本书中回答这个问题。不像在《银河系漫游指南》中给出的答案，我们的答案不会简单地为“42”。

第二章　定律制约



斯克尔狼将恐吓月亮

直到它飞往忧戚之林；

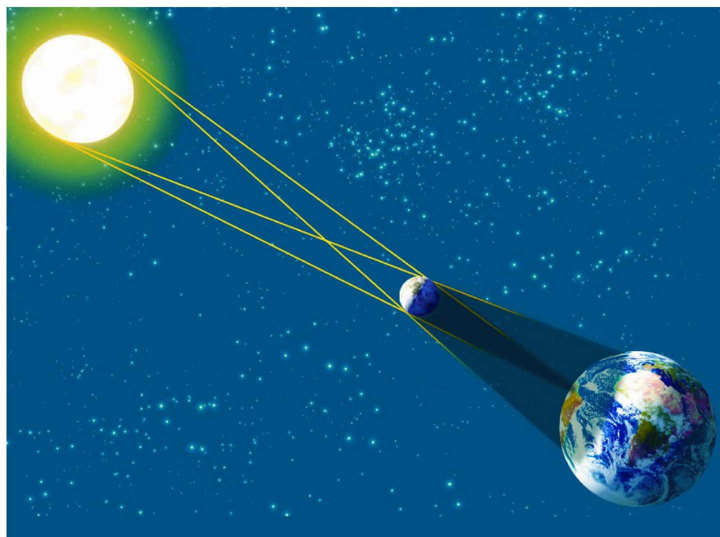
海逖狼将追逐太阳，

它与瑞德威特尼尔沾亲。

——《格里木尼尔之歌》，北欧史诗《埃达》旧版

在北欧神话里，斯克尔狼和海逖狼追逐太阳和月亮。当狼抓住任一个，就会出现日食或月食。当这发生之际，地球人就急忙尽量制造噪声，希望将狼吓跑以拯救太阳或月亮。在其他文化中也有类似的神话。但是过一段时间后，人们一定意识到了，不管他们是否四处大叫大闹，太阳和月亮都会很快地从食中出现。过一段时间后，他们一定也注意到，日食和月食并非随机地发生：它们以规则的自我重复的模式发生。这些模式对于月食而言是非常明显的，尽管古代巴比伦人并未意识到月食是太阳光被地球遮挡所引起的，他们依然相当精确地预言月食。而因为日食只能在地球上大约30英里（1英里＝1.609千米）宽的通道上看到，因而预言日食就更加困难。尽管如此，这模式一旦被理解，它就很清楚地表明日月之食并不归因于超自然存在的一时兴致，而是由定律制约的。

尽管我们的祖先在预言星体运动中取得了一些成功，他们却不能预言自然中的大多数事件。火山、地震、风暴、瘟疫，长到肉里去的脚指甲，似乎所有这一切的发生都没有明显的原因或模式。古人很自然地将大自然的暴烈行为归于一族顽皮或者恶毒的神祇。我们通常认为灾难是人们不知怎么触犯了诸神的征兆。例如，大约公元前5600年，俄勒冈的玛扎玛火山爆发，好多年岩石如雨点般下落，火山灰烧得通红，引发多年落雨，最终水充满了今天被称作克雷特湖的火山口。俄勒冈的克拉玛特印第安人的传说与这一事件的每一个地学细节都相符合，只不过把一个人描绘成灾难的原因使之增加了些许情趣。人们的自责心这么重，总能找到方法去自咎。在那个传奇中，地狱的首领劳迷恋上克拉玛特首领美丽的女儿。她狂傲地拒绝了他，劳为了报复就以火来毁灭克拉玛特。据说幸运的是，天堂首领苏克尔怜悯人类，就和他的地狱对手作战。劳终于受伤，后退至玛扎玛山中，身后留下一个巨大的洞，也就是最后充满了水的火山口。



日食

古人不知什么引起日食，然而他们注意到其发生时的模式。

古人对自然方式的无知，导致他们去发明神祇对人类生活的方方面面作威作福。因而存在爱和战争之神；太阳、月亮和天空之神；海洋和河流之神；风雨雷电之神；甚至地震火山之神。当神高兴时，人类便享受好天气、和平，并免于自然灾害和疾病。当他们不高兴时，干旱、战争、瘟疫和传染病就降临人间。由于人类看不到自然中原因和结果的联系，这些神就显得不可思议，而人们被玩弄于其股掌之上。但是时到大约2600年前，出了个美里塔司的泰勒斯（约前624～约前547年），事情开始改观。自然遵循着一致的可被解释的原则的思想产生了。这就开始了利用宇宙概念来取代神权统治的长期过程。这个概念是：宇宙是由自然定律制约，也是按照我们将来总有一天能读懂的蓝图创生的。

从人类历史的大事年表看，科学探讨只是一个非常新近的努力。我们物种智人是在大约公元前20万年起源于撒哈拉沙漠以南的非洲。书写语言仅可回溯至大约公元前7000年，是农耕社会的产物。（一些最早书写的刻石是有关每位居民的啤酒每日定量。）古希腊伟大文明的最早书写记录可回溯到公元前9世纪。但该文明的高峰“古典时代”是在几个世纪之后到来，始于比公元前500年略早一点。按照亚里士多德（前384～前322年）的说法，大约在那个时期，泰勒斯首先发展如下观念，即世界可被理解，我们周围的复杂事件可被归结成较简单的原理，并不诉诸神秘或神学的解释而得到阐明。

首次预言公元前585年的日食是泰勒斯的功劳，虽然他预言的高度精确性也许只是碰好运的猜测。他是一位模糊的人物，没为后世留下自己的任何著作。他的家是名叫爱奥尼亚地区的知识者中心之一。爱奥尼亚被希腊殖民，它的影响从土耳其最终及于意大利那么远的西方。爱奥尼亚科学是以强烈兴趣来揭示基本规律以解释自然现象为特征的努力，是人类思想史上的一座巨大里程碑。他们的方法是理性的，在许多情形下得到令人惊异地类似于今天我们用更复杂方法使自己相信的结论。它代表了一个伟大的开端。但岁月更迭，爱奥尼亚科学中的许多都被遗忘了——只好重新发现或发明，有时甚至不止一次。

在传说中，今天我们称为自然定律的最早数学表述可回溯至一位名叫毕达哥拉斯（约前580～约前500年）的爱奥尼亚人，他借了以其名字命名的定理而闻名于世：直角三角形的斜边（最长的边）的平方等于其他两边的平方和。据说毕达哥拉斯发现了乐器中弦的长度和声音的谐波组合的数值关系。用今天的语言，我们可将此关系描述成在固定张力下弦振动的频率——每秒振动数——与弦长成反比。从实用的观点看，这就解释了为什么低音吉他的弦必须比通常吉他的弦要长。毕达哥拉斯也许并没有发现这个——他也没有发现以他的名字命名的定理——但是现存的证据表明，人们那时就获知弦长和音高之间的某种关系。若如此，可以将那个简单的数学公式当做今天我们称为理论物理的第一个事例。

除了毕达哥拉斯弦长定律，古代人正确通晓的物理定律只有3条，那是由阿基米德（约前287～约前212年）详述的。阿基米德是古代最杰出的物理学家，远高过所有其他人。三条定律，用今天的术语讲，杠杆定律解释了，因为增加力臂与重臂之比将一个力放大，所以用小的力可以举起大的重物。浮力定律是说，浸入液体的物体，都会受到一个向上的作用力，力的大小等于物体所排开的液体的重量。而反射定律断言，一束光和镜面的夹角等于其反射光束和镜面的夹角。但是阿基米德没有把它们称作定律，他也未就有关观察和测量对它们做解释。他反而将它们处理成仿佛是在一个公理体系中的纯粹数学定理，该体系很像欧几里得为几何创立的那个体系。



爱奥尼亚

古代爱奥尼亚的学者是最早通过自然定律而非神学或神话来解释自然现象的人。

随着爱奥尼亚影响的扩散，其他人继起，看到宇宙具有一个内部秩序，这秩序可能通过观测和理性得到理解。阿那克西曼德（约前610～约前546年），这位泰勒斯的朋友或许学生，论证道，由于人的婴儿诞生时处于无助状态，如果第一个人作为婴儿不知怎么在地球上出现，他就存活不了。阿那克西曼德推理道，因此人应是从其幼年更能吃苦耐劳的其他动物进化而来。这也许是关于人类进化的第一个暗示。恩培多克勒（约前490～约前430年）在西西里观察到使用名叫漏壶的工具。它有时被当做长柄勺使用，就是一个球体，顶部有颈，开口；底部有一些小孔。把它浸入水中，灌满水，封上瓶颈，可以将漏壶从水中提出而不让水从小孔流下。恩培多克勒注意到，如果你在将漏壶浸入前把颈封住，它就不能充水。他推断一定有某种看不见的东西防止水通过小孔进入球内——他发现了我们称为空气的物质。

大约同时，出生于北希腊爱奥尼亚殖民地的德谟克里特（约前460～约前370年）正思考着当你把一个物体分开或切割成小块时会发生什么。他论证道，你应该不能将这个过程无限继续下去。他进而假定，每件东西，包括所有的生物，都由不能被分开切割成部分的基本粒子构成。他把这些终极粒子命名为原子，起源于希腊语中的一个形容词，意思是“不可分割的”。德谟克里特相信，每种物质现象都是原子碰撞的产物。根据他的被称为原子论的观点，所有原子都在空间中到处运动，除非受到干扰，否则将无限地向前运动。今天这个思想被称作惯性定律。

我们只不过是宇宙中的普通栖居者，并非存在于它的中心而优越地成为特殊生物，这个革命性的观念是由最后一批的爱奥尼亚科学家之一，阿里斯塔克（约前310～约前230年）首先提出的。他的计算只有一项留存下来，那就是他对在月食时仔细观测地球落在月面上的影子的大小进行的复杂几何分析。他从其数据中得出结论，太阳一定比地球大得多。也许由小物体应该围绕着庞然大物公转而非相反的思想启示，他成为第一个作出如下论断的人：地球不是我们行星系统的中心，相反，是它和其他行星围绕着大得多的太阳公转。从意识到地球只不过是另一颗行星到我们的太阳也没有什么特别的观念，只有一步之遥。阿里斯塔克觉得，情况就是如此，并且相信我们在夜空看到的恒星实际上只不过是遥远的太阳而已。

古希腊哲学的许多学派各拥有不同而且经常相互矛盾的传统，爱奥尼亚人只不过是其中的一家。可惜的是，爱奥尼亚人的自然观——自然可通过一般定律得到解释并且归结为简单的一族原理——只在几个世纪间发挥了强有力的影响。一个原因是爱奥尼亚理论似乎经常未给自由意志或目的，或者神干涉世界运行的观念留下余地。这些惊人的遗漏使许多希腊思想家极度不安，今天也仍使许多人不安。例如，哲学家伊壁鸠鲁（前341～前270年）基于如下原因反对原子论：与其成为自然哲学家天命的“奴隶”，不如追随神的神话。亚里士多德也拒绝原子的概念，因为他不能接受人是由无灵魂无生命的东西组成的思想。爱奥尼亚人关于宇宙不以人为中心的观念是我们理解宇宙的里程碑，但是这种思想直到几乎20世纪后的伽利略才复活，而不再被抛弃，并被普遍接受。

尽管古希腊人关于自然的猜测极富洞察力，他们的大多数思想作为现代的科学还不够格。一个原因是希腊人还未发明科学方法，他们发展理论并不作为实践验证的目标。这样，若一位学者宣布直到一个原子和第二个原子碰撞之后它才不沿着直线运动，而另一位学者则宣布直到它撞到一个独眼巨人之后它才不沿着直线运动，就不存在客观方法来解决争端。另外，在人类的律条和物理的定律之间也没有清楚的区分。例如，在公元前5世纪，阿那克西曼德写道，万物都从一种初等物质产生，并返回其本源，以免它们“因其恶行被罚”。而根据爱奥尼亚哲学家赫拉克利特（约前540～约前475年）的看法，太阳如此这般行为，否则的话，正义女神将会把它毁灭。几百年之后，大约在公元前3世纪产生的希腊哲学斯多葛学派对人间律法和自然定律作了区分，但是他们将他们认为普适的人类行为规范——诸如崇尚上帝以及服从父母，包括到自

然定律的范畴。另一方面，他们经常以法律的术语描述物理过程，并且相信它们是需要被实施的，尽管被要求“服从”规律的物体无生命。如果你认为使人去服从交通法规很困难，那就去想象说服小行星去沿着椭圆轨道运行吧。

这个传统继续影响着许多世纪后接替希腊人的思想家们。13世纪早期基督教哲学家托马斯·阿奎那（约1225～1274年）采纳这个观点并利用它来论断上帝的存在，他写道：“很清楚，无生命的物体并非偶然地而是有意地到达其终点……因此，有一位智慧的造物主，他命令自然的万物走向其终点。”甚至晚至16世纪，伟大的德国天文学家约翰斯·开普勒（1571～1630年）还相信，行星具有感觉并且有意识地遵循运动定律，它们的“头脑”理解这些定律。

自然定律必须被有意服从的观念反映了古人专注于为何自然如此这般行为，而非它如何行为。亚里士多德是拒绝科学必须主要以观察为基础的思想的那种方法的主要动议者之一。无论如何，古人进行精确测量和数学计算是困难的。我们算术中如此方便的十进位记法只能回溯至大约公元700年。正是印度人为使那个学科成为有力的工具迈出了巨大的第一步。直到15世纪才出现加减的缩写。而在16世纪之前，等号和能计量到秒的时钟都还未出现。

然而，亚里士多德并不认为测量和计算中的问题是发展能够产生定量预言的物理学的障碍，毋宁说，他认为它们没有必要进行。相反，亚里士多德根据一些满足自己心智的原则建立起他的物理学。他隐匿不讨其喜欢的事实，并且把努力集中于事情发生之因，用相对少的精力去精确地详述所发生的。当亚里士多德的结论和观察差别显著不能忽视时，他的确去调整结论。可是那些调整通常只是做些特别解释，只比把矛盾之处贴上纸条糊起来略好一点。以那种方法，不管他的理论多么严重地偏离实际，他总是能改变至恰好似乎足以摆脱其冲突。例如，他的运动论指明重物以和它们重量成正比的恒速度下落。为了解释物体在下落时很清楚地增加速率，他发明了新的原理——当物体靠近其静止的自然地方时，它更喜悦地前进，也就是加速。今天，这个原理用来描述某些人似乎比描述无生命的物体更合适。尽管亚里士多德理论通常只有很小的预言价值，他的科学方法却支配了西方思想界几乎2000年之久。



“如果在长期统治期间我学会了一件事，那便是我们正在被放在火上烤。”

希腊基督教继承者拒绝宇宙由中性的自然定律制约的观念。他们还拒绝人类在宇宙中不占有优势地位的观念。尽管中世纪并没有一个连贯的哲学体系，但基调是宇宙只是上帝的玩具小屋，而宗教是远比自然现象更有价值的研究对象。按照教皇约翰二十一世指示，1277年巴黎主教滕皮尔居然发表了应当予以谴责的219项错误或异端的清单。自然遵循定律的思想是其中一项，因为那与上帝的万能相冲突。有趣的是，数月后，教皇约翰的宫殿屋顶坠落将其砸死，这正是由于引力定律的效应。

17世纪出现了自然定律的现代概念。开普勒似乎是第一个在现代科学意义上理解这个术语的科学家，尽管正如我们说过的，他仍保留有物理对象的泛灵观点。伽利略（1564～1642年）在其大多数著作中不用“定律”这个术语（尽管出现在那些著作的译本之中）。然而不管他是否用了这个词，他的确发现了大量定律，并且提出了两个重要原则，一个是，观测是科学的基础；另一个是，科学的目标是研究存在于物理现

象之间的定量关系。而第一位明确并严格地表述如我们理解的自然定律概念的是勒内·笛卡儿（1596～1650年）。

笛卡儿相信，所有物理现象都必须根据运动物体碰撞来解释，物体由三个定律——牛顿著名的运动定律的前身——来制约。他断言那些定律在所有地方和所有时间都有效，并且明确说明服从那些定律并不意味着这些运动物体具有精神。笛卡儿还理解我们今天称作“初始条件”的重要性。初始条件描述的是我们试图作出预言的任意时段之初的一个系统的状态。在给定的一组初始条件下，自然定律确定一个系统如何在时间中演化，然而若无特定的初始条件，演化就不能被指定。例如，如果在零时刻处于正上空的鸽子释放某物，那个落体的路径就由牛顿定理所决定。但是在零时刻，鸽子是静立在电线上还是以每小时20英里速度飞行，其结果将大为不同。为了应用物理定律，人们必须知道系统是如何出发，或者至少在一确定时刻的状态。（人们还可以利用定律在时间中将系统向过去演化。）

人们既然重新相信存在自然定律，于是便试图将那些定律和上帝的概念相调和。按照笛卡儿的观点，上帝可随心所欲地改变道德原则或者数学定理的对错，但不能改变自然本身。他相信，上帝颁布自然定律，但不能选择这些定律，因为我们所经验的定律是仅有的可能定律，他才挑出这些。这似乎有损上帝的权威，但笛卡儿又论证说，因为定律是上帝自性的反映，所以是不能改变的，由此来躲避触犯上帝。如果这是真的，人们也许会认为，上帝仍然具有创生种种不同世界的选择，每一种对应一套不同的初始条件，但是笛卡儿又否认这个。他论断道，不管在宇宙开端物质安排如何，随着时间推移，它就会演化成和我们一样的世界。此外，笛卡儿感到，上帝一旦让世界启动，他就再也不管它了。

艾萨克·牛顿（1643～1727年）采取类似的观点（有些除外）。正是牛顿使其三大运动和引力的科学定律的现代概念被广泛接受。这些定律解释了地球、月亮和行星的轨道以及潮汐现象等。他创立的若干方程以及其后我们由此而推出的精巧的数学框架，今天仍被讲授。无论是建筑师设计大楼，还是工程师设计轿车，或是物理学家计算如何把登陆火星的火箭瞄准目标，都要使用这些东西。正如诗人亚历山大·蒲伯说的：

自然与自然的法则隐藏在黑夜里，

神说：“让牛顿降生吧！”

于是，一切都是光明。

今天大多数科学家会说，自然定律是一种规则，这种规则乃基于一种观察到的规律性，并能超越它所据以得出的直接情景而提供预言。例如，我们也许注意到，在我们生命的每天早晨，太阳都从东方升起，并提出“太阳总是从东方升起”的定律。这是一个概括，它超出我们对太阳升起的有限观测，并做出将来的可检测的预言。可是，像“这个办公室中的电脑是黑色的”这样的陈述，就不是一条自然定律，因为它只与办公室内的电脑有关，也并未做出诸如“如果我的办公室买一台新电脑，它必然是黑的”这种预言。

我们现在对术语“自然定律”的理解是哲学家长期争论的议题，它是一个比人们初想起来更微妙的问题。例如，哲学家约翰·W·卡罗尔把“所有金球的直径小于1英里”的陈述和诸如“所有铀235球直径小于1英里”的陈述进行比较。从我们对世界的观察得知，没有金球可比1英里更大，并且我们相当自信永不可能。尽管如此，我们没理由相信，不可能有这样的金球，所以该陈述不算是一条定律。另一方面，因为根据我们有关核物理的知识，一旦铀235球长到大约超过直径6英寸（1英寸＝2.54厘米），它就会在一次核爆中自毁。因此我们确定，这样的球不存在。（尝试去制造一个也不是个好主意！）所以，“所有铀235球的直径小于1英里”的陈述可被认为是一条自然定律。这种区分关系重大，因为这阐明了并非所有观察到的概括都可被认为是自然定律，而且大多数自然定律作为更大的相互连结的定律体系的部分而存在。

自然定律在现代科学中通常用数学来表述。它们既可以是精确的，也可以是近似的，但它们必须毫无例外地被遵守——如果不是普适的话，至少在约定的一组条件下必须如此。例如，我们现在知道，如果物体以接近光速的速度运动，牛顿定律必须被修正。然而我们仍然认为牛顿定律是定律，因为对于日常世界的条件，即我们遭遇到的速度远低于光速时，至少在非常好的近似下它们是成立的。

如果自然由定律制约，就产生3个问题：

1.定律的起源是什么？

2.定律存在任何例外即奇迹吗？

3.是否可能只存在一族定律？

科学家、哲学家和神学家以不同的方式讨论这些重要问题，对第一个问题，传统答案——也就是开普勒、伽利略、笛卡儿和牛顿的答案是——定律是上帝的杰作。然而，这只不过是将上帝定义为自然定律的化身。除非人们将其他某些属性赋予上帝，比如，上帝就是旧约中的上帝，利用上帝来回应第一个问题，只不过是用一个神秘来取代另一个神秘而已。这样，如果我们在回答第一个问题时涉及上帝，真正的要害将随着第二个问题而来：是否存在奇迹，也就是对于定律有例外吗？

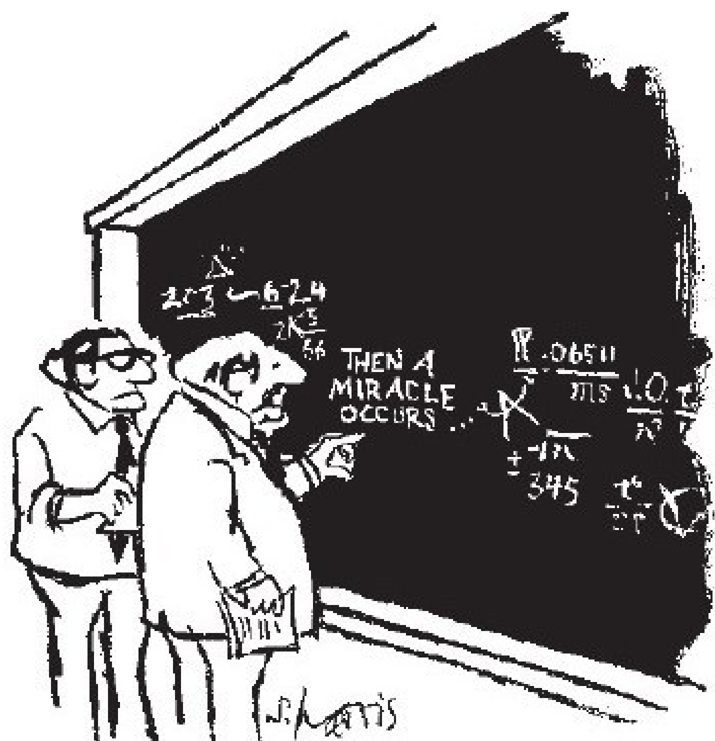
关于第二个问题的答案，意见明显分歧。柏拉图和亚里士多德，这两位古希腊最有影响力的著作家认为，对于定律不存在例外。但如果人们采纳圣经的观点，那么上帝不仅创造定律，而且可应祷告者的祈求而制造例外——使致死的病症逆转，提前结束干旱，或者重新把棒球游戏恢复为奥林匹克项目。和笛卡儿观点截然相反，几乎所有的基督教思想家都坚持上帝一定能够暂时中止定律以完成奇迹。甚至牛顿也相信某类奇迹。因为一个行星对另一个行星的吸引会引起轨道的扰动，这种扰动会随时间而增大，而使行星要么坠入太阳，要么被甩出太阳系，所以他认为行星轨道是不稳定的。他相信上帝必须不停地重置这些轨道，或者“为天钟上弦”以免其松弛。然而，皮埃尔-西蒙·拉普拉斯侯爵（1749～1827年）——通常被叫做拉普拉斯——论断，扰动会是周期性的，也就是以重复的循环为标志，而非积累的。太阳系因此会自我调整，因此不用神的干涉即足以解释它为何维持至今。

拉普拉斯正是清楚地提出科学决定论的第一人：给出宇宙在一个时刻的状态，定律的完备集合就能完全确定其未来和过去。这就摒除了神迹或者上帝主动作用的可能性。拉普拉斯表述的科学决定论就是现代科学对第二个问题的答案。事实上，它是现代科学整体的基础，是贯穿本书的一个重要原则。如果一个科学定律，只当某种超自然的存在决定不干扰时才成立，则不成为科学定律。意识到这一点，据说拿破仑问过拉普拉斯如何把上帝嵌入这个图像，拉普拉斯回答说：“阁下，我不需要那个假设。”

由于人在宇宙中生活并和其中的其他物体互相作用，科学决定论对人也应成立。然而，许多人在接受科学决定论制约物理过程的同时，由于他们相信我们具有自由意志，故认为人类的行为应当例外。例如，笛卡儿为了保存自由意志的观念，断言人的精神是与物理世界不同的东西，而不遵循物理世界的规律。以他的观点，人由两种成分组成，身体

和灵魂。身体只不过是寻常的机器，但灵魂不服从科学定律。笛卡儿对解剖学和生理学非常感兴趣，并认为叫做松果体的位于脑中心的微小器官是灵魂的主要所在。他相信，松果体是所有思想形成之处，是我们自由意志之源泉。

人拥有自由意志吗？如果我们拥有的话，它在进化之树的何处发展而出？蓝绿藻或者细菌具有自由意志吗？抑或它们的行为是无意识的并处在科学定律的王国？是否只有多细胞有机体，或者哺乳动物才会有自由意志？我们也许会认为黑猩猩在大口咀嚼香蕉时，或者一只猫撕碎沙发时是运用自由意志，那么只有959个细胞构成被称作秀丽隐杆线虫的简单生物又如何呢？也许它从未想过：“那里就是我要去吃的味道讨厌的细菌。”可是它对食品也有明确的嗜好，要么满足于乏味的饭食，要么按照新近的经验去寻找更可口的东西。这是在运用自由意志吗？



“我认为你应该在第二步这里更明确些。”

尽管我们感到我们做什么都自有主意，我们对生物分子基础的理解表明，生命过程是由物理和化学定律制约的，因此也是像行星轨道那样是被确定的。新近的神经科学实验支持这样的观点：是我们肉体的大脑，依据已知的自然定律，而非存在于那些规律之外的某种作用，决定

着我们的行动。例如，对进行非全麻脑外科手术的病人的研究发现，用电刺激脑部的适当区域，可以使病人产生移动手、臂或脚，或者嚅动嘴唇并且说话的意欲。如果科学定律确定了我们的行为，就很难想象自由意志如何生效，这样我们似乎仅仅是生物机器，而自由意志只不过是幻影而已。

在承认人的行为的确由自然定律确定之际，似乎得出如下结论也很合理，即：以如此复杂的方式并具有这么多的变量来确定结果，致使实际上不可能做出预言。为此人们会需要人体的一千亿亿亿个分子的每一个的初始态的知识，并且去解差不多同样数量的方程，那要花费几十亿年。对手要打你时，只怕有点来不及闪避。

因为用基础的物理定律去预言人的行为如此不切实际，我们采用所谓的有效理论。在物理学中，有效理论是一种框架，被创造来模拟某种被观察的现象，而不用仔细地描述所有的基本过程。例如，我们不能准确地解制约一个人体的每个原子与地球上的每个原子的引力相互作用的方程。但是对于所有实用的目的，一个人与地球间的引力只需寥寥几个数值，诸如人的总质量等，就可以描述。类似地，我们不能解制约复杂的原子和分子行为的方程，但我们发展了一种称为化学的有效理论，在未解释相互作用的每个细节的情形下，它提供化学反应中原子和分子如何行为的解释。在人的情况中，因为我们不能解确定我们行为的方程，所以我们利用人拥有自由意志的有效理论。研究我们的意志以及所引起的行为的是心理学。经济学也是有效理论，它基于自由意志的观念以及如下假设：人们估计可能的不同行动过程，并且选择最佳者。那个有效理论只能适度成功地预言行为，正如我们都知道的，这是因为决定经常是非理性的，或者是基于对选择后果的有缺陷的分析。所以世界才这么一团糟。

第三个问题是讨论既确定宇宙又确定人行为的定律是否是唯一的。如果你对第一个问题的回答是上帝创造定律，那么这个问题就变成上帝在选择它们上有无余地？不管是亚里士多德还是柏拉图，正如笛卡儿以及后来的爱因斯坦都相信的，自然的原理因出于“必然性”而存在，也就是说，因为它们是仅有的逻辑合理的规则。由于亚里士多德的自然定律的起源是逻辑的信条，他及其信徒觉得人们可以把那些定律“导出”，而不大关注自然实际上如何行为。这个原因，加上集中注意于为什么物体遵循规则而不在乎指明这些规则是什么，把他导向主要是定性的定律，

这些定律经常是错误的，在任何意义上都证明没有多大用处，即使它们许多世纪以来在科学思想中占了统治地位。只是在很久以后，例如伽利略才敢于挑战亚里士多德的权威，并观察自然实际上的行为，而不是去考察纯粹“理性”说它应如何行为。

本书依据科学决定论的概念，它表明对第二个问题的答复是不存在奇迹或者自然定律的例外。我们还会回过头来深入地研究第一个和第三个问题，即定律如何出现，它们是否为仅有的可能定律。不过，我们首先在下一章中讨论自然定律所描述的究竟是什么东西。大多数科学家会说，它们是一个外在的实在的数学反映，这个外部世界独立于观察者而存在。但是，当我们深思自己观察周围世界并形成概念的方式之际，我们会邂逅如下问题：我们真有理由相信一个客观存在的实在吗？

第三章　何为实在



几年前，意大利蒙札市议会禁止宠物的主人把金鱼养在弯曲的鱼缸里。提案的倡议者解释此提案的部分理由是，因为金鱼向外凝视时会得到实在的歪曲景色，因此将金鱼养在弯曲的缸里是残酷的。然而，我们何以得知我们拥有真正的没被歪曲的实在图像？难道我们自己不也可能

处于某个大鱼缸之内，一个巨大的透镜扭曲我们的美景？金鱼的实在图像固然和我们的不同，然而我们能肯定它比我们的更不真实吗？

金鱼的实在图像和我们自己的不同，但金鱼仍然可以表述制约它们观察到的在鱼缸外面物体运动的科学定律。例如，由于变形，我们观察一个自由物体在一条直线上运动，会被金鱼观察成它是沿着一条曲线运动。尽管如此，金鱼可以从它们变形的参照系中表述科学定律，这些定律总是成立，而且使它们能预言鱼缸外的物体的未来运动。它们的定律会比我们参照系中的定律更为复杂，但简单性只不过是口味而已。如果一条金鱼表述了这样的一个理论，我们就只好承认金鱼看到的是实在的一个正确的图像。

托勒密（约85～约165年）在公元150年左右提出一个描写星体运动的模型，这是一个不同实在图像的著名例子。托勒密的研究发表在一部十三卷的专著中，这部专著通常以阿拉伯文题目《天文学大成》而众所周知。《天文学大成》的开宗明义就是解释为什么认为地球是一个球形的、静止的、位于宇宙中心，并与星空的距离相比是小到可以忽略。虽然阿里斯塔克曾提出过日心模型，但至少自亚里士多德时代开始，大多数有教养的希腊人都持有这些信仰。亚里士多德由于神秘的原因相信，地球应该位于宇宙的中心。在托勒密模型中，地球静止地位于中心，行星和恒星在非常复杂的轨道上围绕着它运行，这些轨道牵涉到周转圆，就像轮子上的轮子。

这个模型似乎是自然的，因为我们确实没觉得脚下的地球在运动（除了地震或者激情澎湃的时刻）。后来的欧洲学术乃基于传承下来的希腊之源，于是亚里士多德和托勒密的观念就成为多数西方思想的基础。天主教会采用托勒密的宇宙模型当做正式教义达14个世纪之久。直至1543年，哥白尼才在他的著作《天体运行论》中提出一个别样的模型。虽然他已花了几十年来研究此理论，该书在他逝世那年才得以出版。

像大约早17世纪的阿里斯塔克一样，哥白尼描写了一个世界，其中太阳处于静止，而行星以圆周轨道绕着它运转。尽管这个思想并不新，其复活却遭到激烈的抵制。哥白尼模型被认为和圣经相抵触，尽管圣经从未清楚地说明，但一向被解说成行星围绕着地球运动。事实上，在撰写圣经的时代，人们相信地球是平坦的。哥白尼模型引起关于地球是否静止不动的狂烈辩论。这场辩论于1633年因伽利略受到异端审判而达到

高峰。他的罪名是提倡哥白尼模型并认为“在一种信念被宣布并确定为与圣经冲突之后，人们竟仍然可以把它当做可能的信念予以坚持并捍卫”。他被裁决有罪，判为终身软禁，并被迫宣布放弃原先的信仰。据说他低声嘀咕道：“可是它仍在运动。”1992年，罗马天主教廷终于承认谴责伽利略是错误的。



托勒密宇宙

按照托勒密观点，我们生活在宇宙的中心。

那么，托勒密系统和哥白尼系统，究竟哪个是真实的？尽管人们时常说哥白尼证明了托勒密是错的，但那不是真的。正如在我们的正常视像跟金鱼的视像相比较的情形，人们可以利用任一种图像作为宇宙的模型一样，对于我们天空之观测，既可从假定地球处于静止，也可从假定

太阳处于静止得到解释。尽管哥白尼系统在有关我们宇宙本性的哲学辩论中作用很大，然而它的真正优势是在太阳处于静止的坐标系中运动方程要简单得多。

在科幻影片《黑客帝国》（Matrix）中发生了不同类型的另类实在。影片中的人类不知不觉地生活在由智慧电脑制造的模拟实在之中，过得平安而满意，电脑则吸吮着活人的生物电能（不管为何物）。这也许没那么牵强，因为许多人宁愿在网络的虚拟实在中消磨时日，像在网站“第二人生”中那样。我们何以得知，我们不仅仅是一部电脑制作的肥皂剧中的角色呢？如果我们生活在合成的虚拟世界中，事件就不必具有任何逻辑或一致性或服从任何定律。进行操控的外星人也许在看到我们反应时会觉得更有趣更开心，例如，如果满月分开两半，或者在这世界上每个节食的人显示对香蕉奶油饼的毫不节制的渴望。但是如果外星人实施一致的定律，我们就无法得知在这模拟的实在背后是否还有另一个实在。将外星人生活的世界称作“真的”，而把合成世界当做“假的”是很容易的事情。但是如果——正如我们这样——在模拟世界中的生物不能从外面注视到他们的宇宙之中，他们就没有理由怀疑他们自己的实在图像。这是我们都是他人梦中幻影这一观念的现代版本。



从这些例子中，我们可得到对于本书非常重要的结论：不存在与图像或理论无关的实在概念。相反地，我们将要采用称为依赖模型的实在论观点：一个物理理论和世界图像是一个模型（通常具有数学性质）和一组将这个模型的元素与观测相连接的规则的思想。这提供了一个用以解释现代科学的框架。

自柏拉图以来，哲学家们长期争议实在的性质。经典科学是基于这样的信念：存在一个真实的外部世界，其性质是确定的，并与感知它们的观察者无关。根据经典科学，某些物体存在并拥有诸如速率和质量等物理性质，它们具有明确定义的值。在这种观点里，我们的理论是试图去描述那些物体及其性质，并且将我们的测量和感觉与之对应。无论是观察者还是观察对象，都是具有客观存在的世界的部分，它们之间的任何区别都是无意义的。换言之，如果你看到一群斑马在停车场争夺一块地方，那是因为真的有一群斑马在停车场争夺那个地方。所有其他正在

看的观察者都会测量到同样的性质，而且不管是否有人在看这群斑马，它们都具有那些性质。在哲学中，这一信念称为实在论。

虽然实在论也许是诱人的观点，然而正如我们将在下面看到的，我们有关现代物理学的知识使得要为它辩护变得非常困难。例如，根据精确描述自然的量子物理原理，除非并且直到一个粒子的位置或速度被一位观察者测量，这个粒子既不拥有确定的位置，也不拥有确定的速度。因此，说测量之所以给出一定的结果是因为被测量的量在测量的时刻具有那个值，那说法是不正确的。事实上，在某种情形下，单独的物体甚至并没有独立的存在，而仅作为一个众多的系综的部分而存在。而且，如果一种称为全息原理的理论被证明是正确的，那么我们以及我们的四维世界可能是一个更大的五维时空在边界上的影子。在那种情形下，我们在宇宙中的地位即类似于金鱼的状况。



“你们两位有某种共同的东西。戴维斯博士发现了没有看到过的粒子，而希格伯发现了没有看到过的星系。”

彻底的实在论者经常争辩道，科学理论描绘实在的证明在于它们的成功。但不同理论可以通过全异的概念框架成功地描述同样的现象。事实上，许多已被证明成功的理论后来被其他基于全新的实在性概念之上的同样成功的理论所取代。

传统上，那些不接受实在论的人被称为反实在论者。反实在论者相

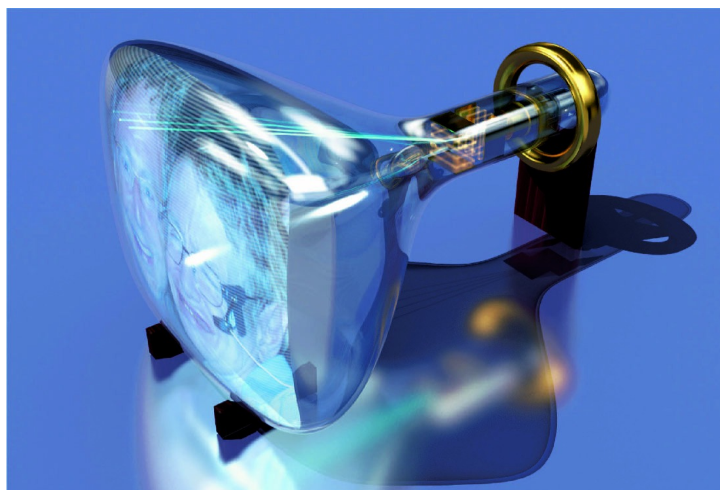
信，经验知识和理论知识彼此不同。他们一向争论道，观察和实验是有意义的，而理论只不过是有用的工具，并不体现任何涉及被观察现象的基础的更深刻真理。一些反实在论者甚至要将科学限制于可被观察的东西。因为这个原因，19世纪时的许多人基于我们永远看不见原子而拒绝原子的概念。乔治·贝克莱（1685～1753年）甚至如此极端，他断言除了精神及其思想，没有任何东西是存在的。当英国作家兼辞典编纂家塞缪尔·约翰生博士的一位朋友对他说起不可能反驳贝克莱的论调时，据说约翰生的反应是走近一块大石头，踢它一脚并宣布："我如此反驳他。"当然，约翰生感觉的脚痛也还是他头脑中的一个思想，所以他还未真正驳斥贝克莱的观念。但这一行为确实解释了哲学家大卫·休谟（1711～1776年）的观点，后者写道，尽管我们没有合理的理由相信一个客观的实在，我们也别无选择，只好权当它真是那样的。

依赖模型的实在论使实在论和反实在论的思想流派之间所有这类争议和讨论变得毫无意义。按照依赖模型的实在论，去问一个模型是否真实是无意义的，只有是否与观测相符才有意义。如果存在两个都和观测相符的模型，正如金鱼的图像和我们的图像，那么人们不能讲这一个比另一个更真实。在所考虑的情形下，哪个更方便就用哪个。例如，如果一个人处于金鱼缸内，那么金鱼图像会是有用的。但若是身处鱼缸之外，倒用地球鱼缸的参考框架去描述远在星河之外的事件，就会非常笨拙，尤其是因为地球围绕太阳公转并围绕着自己的轴自转，而鱼缸在随着地球运动。

我们固然在科学中制造模型，然而我们在日常生活中也制造模型。依赖模型的实在论不仅适用于科学模型，还适用于我们所有人为了解释并理解日常世界而创造的有意识和下意识的心理模型。没办法将观察者——我们——从我们对世界的认识中排除，认识是通过感觉过程以及通过思维和推理方式产生的。我们的认识——因而我们的理论以之为基础的观测——不是直接的，而是由一种类似透镜之物——我们人脑的解释结构塑造的。

依赖模型的实在论符合我们感觉对象的方式。在视觉中，人的大脑从视觉神经接受一系列信号。那些信号并不构成你会从电视接受的那类图像。在视觉神经连接视网膜之处有一盲点，还有你的视场具有高分辨率的部分仅处于视网膜中心周围大约1度的狭窄视角，这个范围的角度和你伸出手臂时大拇指的宽度一样。而如此送入你大脑的未加工的数据

就像是有个洞一样古怪的图像。幸运的是，人脑处理那个数据，将两只眼睛的输入结合在一起，假定邻近位置的视觉性质类似，再填满缝隙并应用插入技术。此外，大脑从视网膜读到二维的数据排列并由它创生三维空间的印象。换言之，大脑建立心理图像或模型。



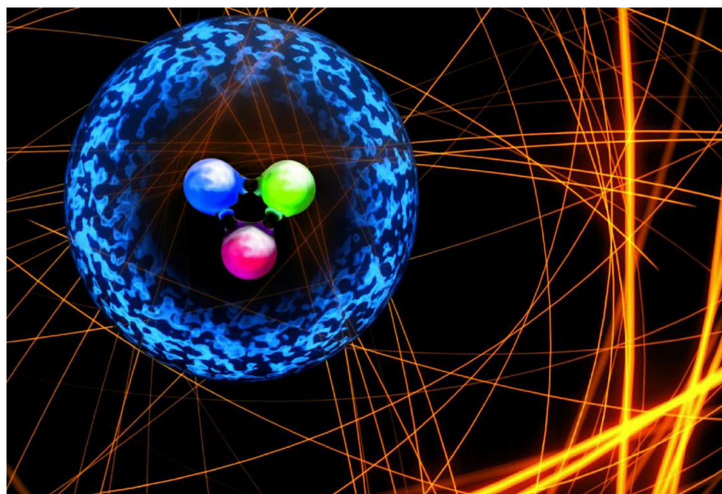
阴极射线

我们看不见单独的电子，然而我们能看到它们产生的效应。

在建立模型方面，大脑是如此称职，如果人们配上一种上下颠倒其眼中之像的眼镜，他们的大脑在一段时间后就会改变模型，使之重新看到处于正确方向的东西。如果之后摘下眼镜，在一段时间内，他们看到的世界是上下颠倒的，然后会再次适应。这表明，当一个人说“我看到一把椅子”时，他的意思仅仅是他利用椅子散射来的光建立一个椅子的心理图像或模型。如果模型上下颠倒，在他坐到椅子上去之前，幸运的是，他的脑子会改正那个模型。

依赖模型的实在论解决或至少避免的另一个问题是存在的意义。如果我走出房间而看不见桌子，我何以得知那桌子仍然存在呢？那么说我们看不见的东西，诸如电子或据说是构成质子和中子的叫做夸克的粒子存在是什么意思呢？人们当然可以拥有一个模型，在该模型中，当我离开时桌子消失了，而当我返回时，桌子又在同一位置出现了。然而那会是笨拙的。而如果我在外面时发生了某些事情，比如讲天花板落下怎么办呢？在我离开房间时桌子消失的模型下，我能够解释下次我进入时在天花板碎片之下损毁的桌子重现的事实吗？还是桌子留在原地不动的模型简单得多，并与观测相符。人们能问的，也就是如此了。

在我们看不见的亚原子粒子的情形下，电子是一个有用的模型，它能解释像在一个云雾室中的轨迹和电视显像管上的光点这类观测结果，以及许多其他现象。据说，1897年英国物理学家J.J.汤姆孙在剑桥大学的卡文迪许实验室发现了电子。他是利用在真空玻璃管中的电流来做称为阴极射线现象的实验。从实验中，他获得一个大胆的结论：神秘的射线由微小的“微粒”构成，这种微粒是原子的构成物质，那时原子还被认为是物质的不可分的基元。汤姆孙没有看到“电子”，他的实验也没有直接或清晰地证明他的预测。但无论应用于基础科学还是应用到实际工程中，都证明这个模型是关键的，而现在所有的物理学家都确信电子存在，即便看不到它。



夸克

尽管单独夸克不能被观测到，但是夸克的概念是我们基本物理理论的一个不可或缺的要素。

我们也看不见夸克，它是解释原子核中的质子和中子性质的一个模型。虽然说夸克构成质子和中子，因夸克之间的束缚力随着分离而增大，因此孤立的自由夸克不可能在自然中存在，所以我们永远观察不到夸克。相反地，它们永远以3个一组（质子和中子）或者以夸克反夸克对（π介子）存在，而它们就像被橡皮带连接在一起似的。

在夸克模型首次提出之后的年月里，人们一直在争议一个问题：如果你永远不能分离出一个夸克，说夸克真的存在是否有意义。一些亚亚核粒子的不同结合构成了某些粒子的思想提供了一种编组原理，由此对其性质给予简单而吸引人的解释。但是，尽管物理学家已习惯于接受那些粒子，它们的存在仅由有关其他粒子散射数据中统计的哔哔声推断而

来。但是，对许多物理学家而言，将实在性赋予一个在原则上也许不能被观测到的粒子，这个思想是太过分了。然而，这么多年来，随着夸克模型导出愈加正确的预言，反对的声音也随之消退。某种拥有17只手臂、红外眼以及习惯从耳朵吹出浓缩奶油的外星生物会进行与我们相同的实验观察，但不用夸克描述之，这是完全可能的。尽管如此，根据依赖模型的实在论，夸克乃存在于一个和我们对亚核子粒子如何行为的观察相一致的模型中。

依赖模型的实在论能够为讨论诸如下述之类的问题提供框架：如果世界是在有限的过去创生的，那么在那之前发生了什么？一位早期的基督教哲学家圣·奥古斯丁（354～430年）说，其答案不是上帝正为问此类问题的人们准备地狱，而是时间乃是上帝创造的世界的一个性质，时间在创生之前不存在，他还相信创生发生于过去不那么久的时刻。这是一个可能的模型。尽管在世界上存在化石和其他证据使之显得古老得多，（它们被放在那里是用来愚弄我们的吗？）那些坚持创世记中的叙述确实为真的人很喜欢这个模型。不过，人们还能拥有一个不同的模型，在这模型中时间回溯137亿年到达大爆炸。那个模型解释了包括历史和地学的证据在内的大部分现代观测，它就是我们拥有的对过去的最好描绘。第二种模型能解释化石和放射性记录，以及我们接受来自距离我们几百万光年的星系的光这一事实。因此，这个模型——大爆炸理论——比第一个更有用。尽管如此，没有一个模型可以说比另一个更真实。

有些人支持时间能回到甚至比大爆炸还早的模型。目前还不清楚其中时间回溯到比大爆炸还早的模型是否能更好地解释现代的观测，因为宇宙演化的定律似乎在大爆炸处崩溃。如果是这样，那么去创造一个包含早于大爆炸的时间的模型就没有意义，因为那时存在的东西对于现在没有可观测的后果，如此我们不妨坚持大爆炸即是世界的创生这一观念。

一个模型是个好模型，如果：

1.它是优雅的，

2.它包含很少任意或者可调整的元素，

3.它和全部已有的观测一致并能解释之，

4.它对将来的观测做详细的预言，如果这些预言不成立，观测就能证伪这个模型。

例如，在亚里士多德的理论中，世界由土、气、火和水4种元素构成，而且物体是为了满足自己的目的而行为。这个理论是优雅的，并不包含可调节的元素。但在许多情形下，它并未做出确定的预言，而当它预言时，又并不总与观测相一致。这些预言中的一个是，因为物体的目的是下落，因此较重的物体应下落得较快。在伽利略之前似乎没人想到过去验证这个预言。传说他从比萨斜塔上释放重物来检验它。这故事可能是伪造的，但我们知道，他确曾把不同的重物从一斜面上滚下，并且观察到它们都以同样速率获得速度，这与亚里士多德的预言相矛盾。

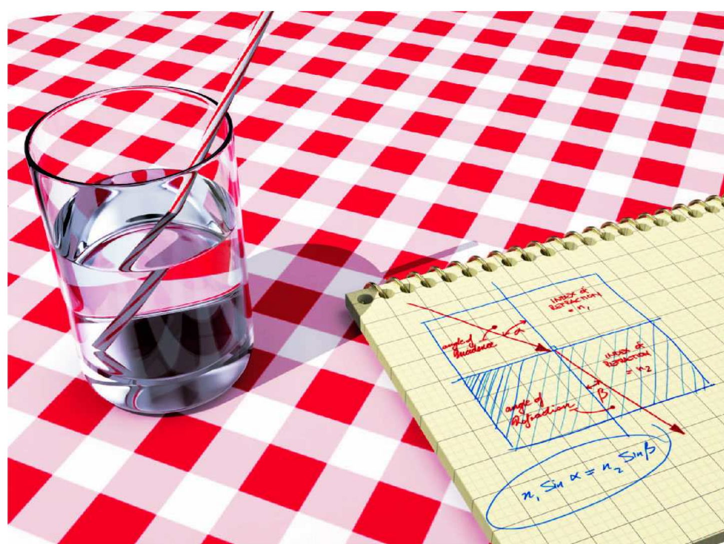
上面的标准显然是主观的。例如，优雅就不是容易测量的某种东西，但科学家们非常重视它，因为自然定律就是意味着把许多特殊情况经济地压缩成一个简单公式。优雅是指理论的形式，但它与可调整元素的阙如紧密相关，因为，一个充满了修修补补因素的理论不很优雅。套用爱因斯坦的话说，一个理论应该尽可能简单，但不能更简单了。托勒密把周转圆加到周转圆上，或者甚至在其上再加周转圆。虽然增加的复杂性可使模型更精确，可科学家不满意一个被扭曲去迎合特有的一组观测的模型；他们倾向于把它看成数据表，而非一个可能体现任何有用原理的理论。

在第五章中，我们将要看到，许多人认为描写基本粒子相互作用的“标准模型”不算优雅。那个模型比托勒密的周转圆成功得多。它在几个新粒子被观测到之前就预言其存在了，并于几十年间以巨大的精确性描述了极多实验的结果。但它包含了几十个可调节的参数，其数值必须为了配合观测而确定，而不是由理论本身所确定的。

关于第四点，当新的令人震惊的预言被证明正确时，总是给科学家留下深刻印象。另一方面，当一个模型发现做不到这一点时，一种普遍反应是说实验错了。如果证明不是那种情形，人们经常仍然不抛弃这个模型，而试图通过修正来挽救它。尽管物理学家执著地努力拯救他们所赞美的理论，但随着改动变得做作而且繁琐，理论因此而变得“不优雅”时，人们修正理论的热情也就消退了。

如果容纳新的观测所需的修正过分雕琢，这就标志着需要新模型了。稳态宇宙的观念是老模型迫于新观测而撤退的一个例子。1920年

代，多数科学家相信宇宙是静止的，或者在尺度上不变。后来埃德温·哈勃于1929年发表了他的观测，显示宇宙正在膨胀。哈勃观察到由星系发射出的光，但并未直接观察到宇宙在膨胀。那些光携带特征记号，或曰基于每个星系成分的光谱。如果星系相对于我们运动，光谱就会发生一定量的改变。因此，哈勃由分析远处星系的光谱便能够确定它们的速度。他原先预料会发现离开我们运动的星系数目与趋近我们运动的星系一样多。相反地，他发现几乎所有的星系都在作离开我们的运动，而且处在越远的地方，它们就运动得越快。哈勃得出结论，宇宙正在膨胀。但其他人坚持早先的模型，试图在稳态宇宙的框架中解释他的观测。例如，加州理工学院的物理学家弗里茨·兹威基提出，也许由于某些还未知的原因，当光线穿越巨大距离时慢慢地损失能量。兹威基提出了一个能量损失对应于一种光谱的改变，它能够模拟哈勃的观测。在哈勃之后的几十年间，许多科学家继续坚持稳态理论，但最自然的模型还是哈勃的膨胀宇宙模型，而今它已经被接受了。



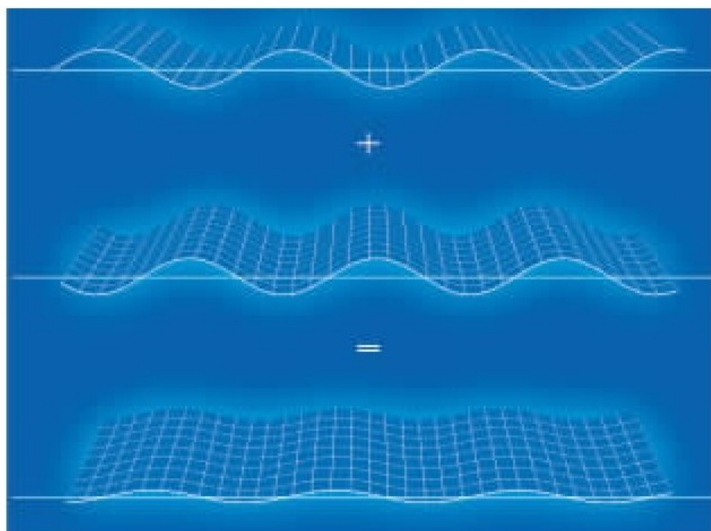
折射

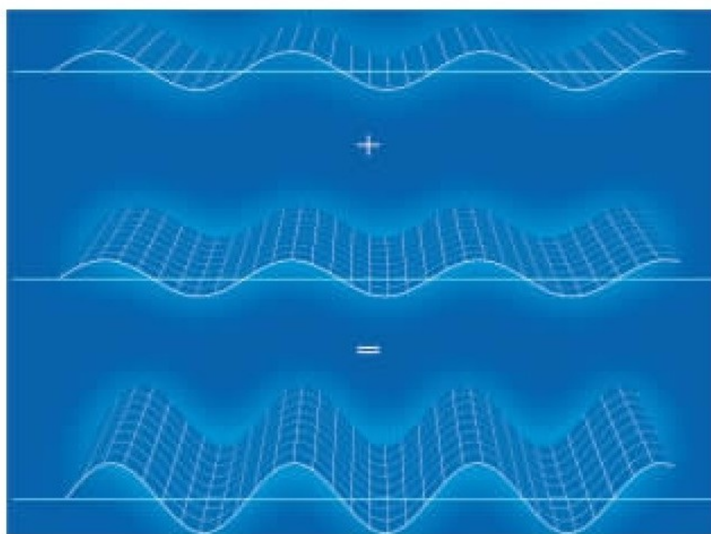
牛顿的光模型能解释为什么光从一种介质进入另一种介质时弯折，但它却不能解释我们现在称为牛顿环的另一种现象。

在探寻制约宇宙的定律之际，我们表述了许多理论或模型，诸如四元素理论、托勒密模型、热素理论和大爆炸模型等。我们的实在概念和宇宙基本成分的概念伴随着每个理论或模型而改变。比如，想想光的理论。牛顿认为光是由小粒子或微粒构成。这就解释了为什么光会沿直线

行进，而且牛顿利用它来解释当光从一个媒质进入另一个媒质，比如从空气进入玻璃或者从空气进入水时，它为什么弯折或折射。

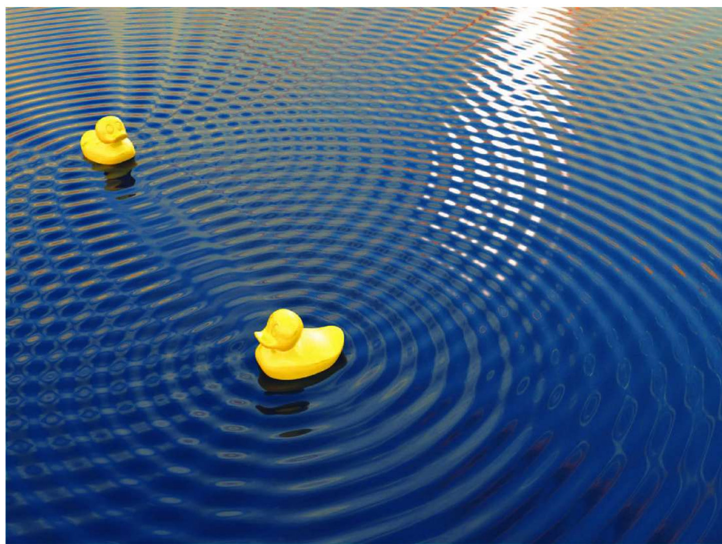
然而，微粒论不能解释牛顿自己观察到的称作牛顿环的现象。把一个透镜置于一面平坦的反射板上，并用单色光诸如钠光对其照射。从上往下看，人们将看到一系列明暗相间的圆环，它们以透镜和表面接触点为圆心。用光的粒子论来解释这个现象很困难，但在波动论中就能得到解释。根据光的波动论，那被称作干涉的现象导致亮环和暗环。一个波，比如水波，是由一系列波峰和波谷组成的。当波碰撞时，如果那些波峰和波谷刚好分别一致，它们就互相加强，获得更大的波。这称为相长干涉。在这种情形下，波被称为处于“同相”。在另一种极端，当波相遇时，一个波的波峰可能刚好与另一个波的波谷重合。在那种情形下，波相互对消，被称为处于“反相”。这种情形称为相消干涉。





干涉

正像人一样，在波相遇时它们会倾向于要么相互加强，要么相互削弱。



池水干涉

干涉概念在日常生活中出现，在从水池到海洋的水体中。

在牛顿环中，亮环位于离开中心一段距离之处，在这些位置，透镜与反射板相分离的程度，使得从透镜反射的光波与从反射板反射的光波错开波长的整数（1，2，3，……）倍，产生了相长干涉。（波长是一个波的波峰或波谷和下一个波峰或波谷之间的距离。）另一方面，暗环离开中心的距离不同，在这些位置上，两组反射波错开波长的半整数（1/2，3/2，5/2，……）倍，引起相消干涉——从透镜反射的波抵消了从平板反射回来的波。

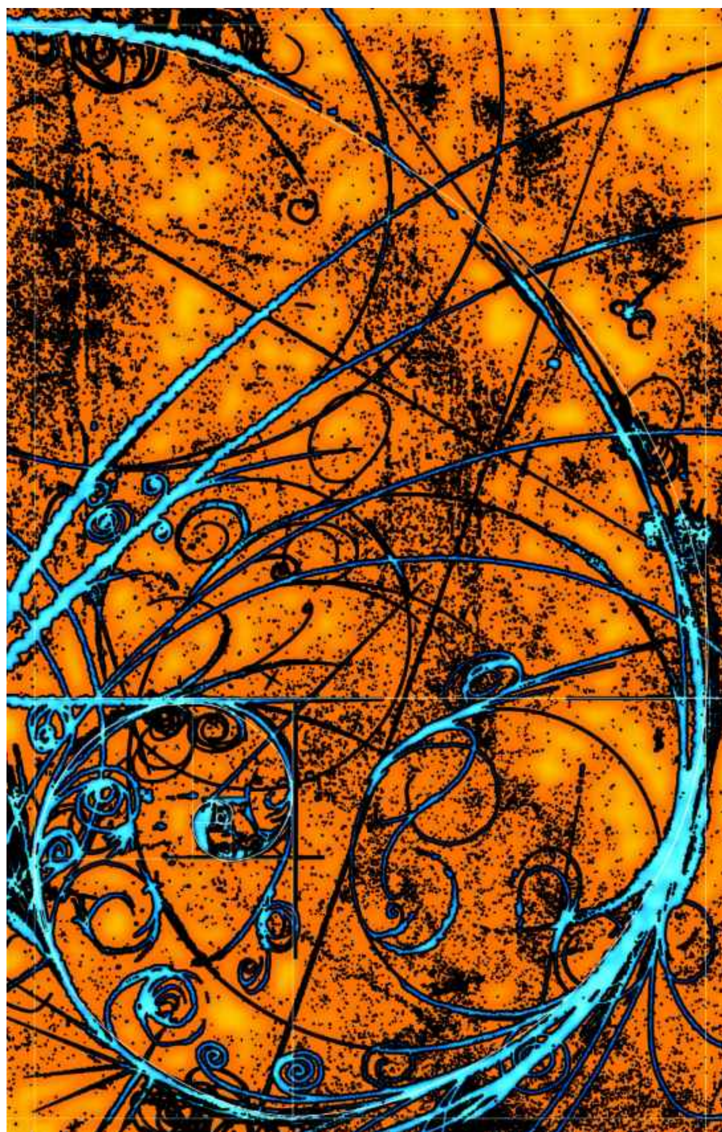
在19世纪，人们认为，这个现象确认了光的波动论，而证明了粒子论是错误的。然而，在20世纪早期，爱因斯坦证明，用光粒子或量子打到原子上并打出电子可解释光电效应（现在用于电视和数码相机中）。这样，光既作为粒子又作为波来行为。

波的概念深入人心，或许是因为人们见过海洋，或者见过把一块小石子儿扔进后的小池塘。事实上，如果你曾将两块小石子儿扔进小池，你也许看到了干涉作用，正如在前面图画中那样。其他的液体也能观察到类似的行为，也许除了酒以外，如果你喝得太多的话。从岩石、圆石和沙就很熟悉粒子的概念了。但这种波/粒二重性——一个对象既可描述成粒子也可描述成波的思想——对于日常经验而言，却犹如你能喝下一块沙岩的想法那么怪异。

类似这样的二重性——两个非常不同的理论精确地描述了同样的现象的情形——和依赖模型的实在论相一致。每个理论都能描述并解释某些性质，而没有一个理论能说比其他理论更好或更真实。考虑制约宇宙的定律，我们所能说的是：似乎不存在一个单一的数学模型或理论能够描述宇宙的方方面面。相反地，正如开篇提到的，似乎存在一个称作M理论的理论网络。在M理论网络中，每个理论都能很好地描述一定范围的现象。只要在其范围交叠之处，网络中的不同理论相符，则它们都能被称作同样理论的一些部分。但在这个网络中没有一个单一的理论可能描述宇宙的各个方面——所有的自然力，感受到那些力的粒子，以及这一切在其中发生的空间和时间框架。尽管这种情形未实现传统物理学家的统一理论之梦，然而在依赖模型的实在论的框架中是可被接受的。

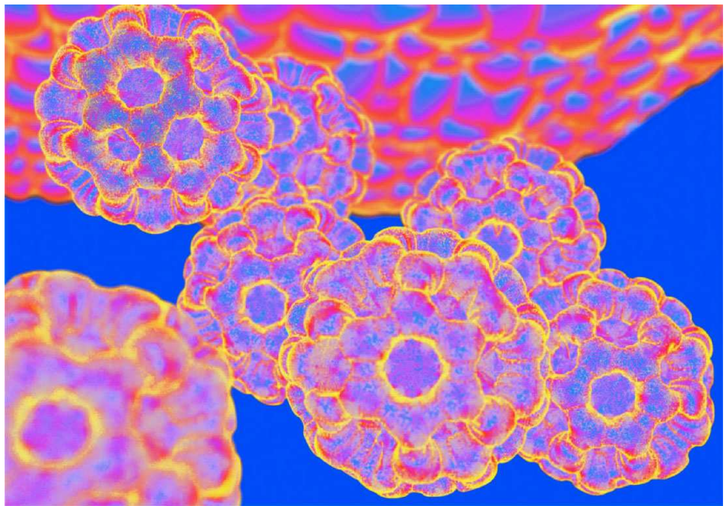
我们将在第五章中进一步讨论二重性和M理论，但在这之前，我们将转向量子论，它是作为我们现代自然观基础的基本原理。我们要特别关注称作可择历史的量子论方法。按照那种观点，宇宙并非仅具有单一的存在或历史，而是每种可能的宇宙版本在所谓量子叠加中同时存在。这听起来就像只要你离开房间桌子就会消失的理论一样疯狂，然而这里的情况是，该理论通过了它所经受的所有实验的验证。

第四章　可择历史



1999年，一队物理学家在奥地利向一个障碍发射了一串足球状的分子。那些每个由60个碳原子组成的分子有时被称作巴基球，因为建筑学家巴克明斯特·富勒建造过那种形状的建筑物。富勒的短程线圆顶结构也许是目前世界上最大的足球状物体，而巴基球则是最小的。科学家瞄准

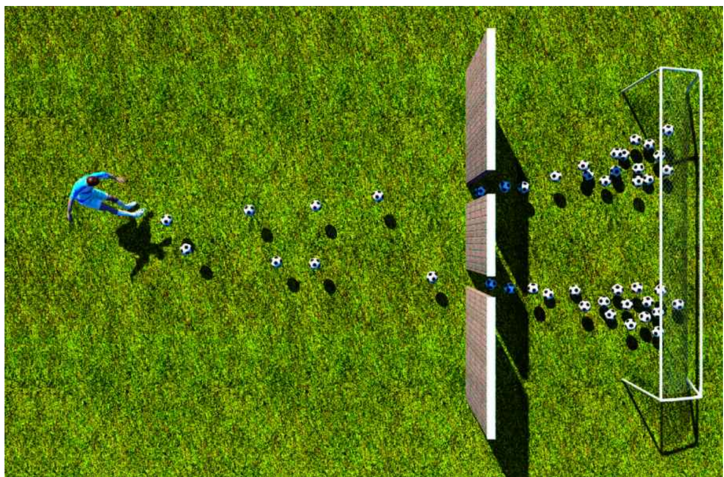
的障碍墙实际上具有两道巴基球能通过的窄缝。在墙后面，物理学家放置一个相当于屏幕的东西以检验和计数出现的分子。



巴基球

巴基球像碳原子做的微观足球。

如果我们用真的足球做一个类似的实验，我们就需要一位准头平平的球手，却能要多快有多快地连发猛射。我们让这个球手位于有两条窄缝的墙之前。在墙的另一面，平行地放张长网。球手射出的球多数都打到墙上被弹回，如果缝隙只比足球稍宽些，在墙的另一面会出现两束高度平行的足球的流注。而如果缝隙再宽些，每一束流注就会以扇形展开一些，如下图所示。



双缝足球

一名足球射手把球踢到一堵墙的缝上，会产生一个明显的条纹。

请注意，如果我们关闭一道缝隙，与其相应的足球的流注就不再通过，但这对另一束流注没有影响。如果我们重开第二道缝隙，那只会增加落到另一面的任何给定点的球的数目，因为那时我们就会得到通过一直开着的缝隙的球再加上从新开的缝隙来的其他球。换言之，在两道缝隙都打开时，我们观察到的是我们在墙上的每道缝隙分别打开时观察到的总和。这是我们在日常生活中习以为常的现实。但这不是奥地利研究者在射出他们的分子时发现的情形。



巴基球足球

当分子足球被射到屏幕的缝隙上，产生的条纹反映了陌生的量子定律。

在奥地利实验中，打开第二道缝隙，在屏幕上一些点处到达的分子数目的确增加了——但在他处这个数目减少了，正如下图所示。事实上，当两道缝隙都打开时存在一些巴基球根本达不到的地方，而就在这些地方，当两道缝隙中只有任何一道打开时球确实到达。这似乎非常古怪。打开第二道缝隙何以使到达某些点的分子变得更少呢？

我们可由审视细节获得答案的线索。在这个实验中，许多分子足球打到——如果球分别通过这道缝隙或那道缝隙——你预料它们击中之处的中点。非常少的分子到达偏离中点稍远处，但是在离那个中心更远处，你又会观测到有分子到达。这种模式不是每个缝隙分别打开时形成的模式之和，但是你可以认出：它正像第三章里所描述的干涉波的特征条纹。没有分子到达的地方对应于从两缝发射来的波到达时的反相，并产生相消干涉；而许多分子到达的地方对应于波到达时的同相，并产生相长干涉。

在科学思想的最初2000年许，理论解释是基于通常的经验和直觉之上。随着我们改善技术并扩展可能观测的现象范围，我们开始发现自然行为的方式和我们的日常经验，也因此和我们的直觉越来越不一致，正如巴基球实验所显示的那样。那个实验是经典科学涵盖不了的，而只能归于所谓量子物理所描述的那一类典型现象。事实上，理查德·费恩曼写道：我们刚才描述的那个双缝实验“包含了量子力学的所有秘密”。

在发现牛顿理论不足以描述在原子或亚原子水平上的自然之后，20世纪前期发展了量子物理的原理。物理的基本理论描述自然力和物体对这些力如何反应。比如，牛顿的经典理论是在反映日常经验的框架的基础上建立的。物体在其中具有单一的存在，能位于一个确定的位置，遵循确定的路径等。量子物理为理解自然如何在原子和亚原子尺度下的运行提供框架，但正如我们将更仔细看到的，它要求完全不同的概念范型，在那里物体的位置、路径甚至其过去和未来都不能被精密确定。诸如引力或者电磁力等各种自然力的量子理论就是在那个框架中建立的。

基于和日常经验如此陌生的框架之上建立的理论还能解释被经典物理学如此精确地模拟的寻常经验吗？它们能，因为我们以及我们周围的一切都是复合结构，是由多到不能想象的原子组成的，原子的数量比在可观察宇宙中的星辰还要多。而尽管其组成部分的原子服从量子物理原理，人们可以证明，形成足球、大萝卜和大型喷气飞机——以及我们——的大量原子集合确能避免通过缝隙时绕射。这样，虽然日常物体的组成部分服从量子物理，牛顿定律还是形成一个有效理论，它非常精确地描述形成我们日常世界的复合结构如何行为。

这听起来似乎很奇怪，但是在科学中有许多情形，大群体以与它个别成分的行为不同的方式行为。单个神经元的反应几乎不能成为人脑反应的前兆，有关水分子的知识也未能告诉你多少关于湖泊变化的信息。在量子物理的情况中，物理学家仍在努力捉摸牛顿定律如何从量子世界浮现出来的那些细节。我们所知道的是，所有物体的部分服从量子物理定律，而牛顿定律则以很好的近似描述着由那些量子成分构成的宏观物体的行为方式。

因此，牛顿理论的预言和我们大家在经历周围世界时发展的实在性观点相符合。但是单个原子和分子以一种和我们日常经验根本不同的方式行为。量子物理是一种新的实在模型，它为我们提供了宇宙的图像。这是一种这样的图像，许多对我们直观理解实在来说至关重要的概念在

其中都不再具有意义。

1927年，贝尔实验室的实验物理学家克林顿·达维孙和勒斯特·泽默首次实施了电子双缝实验，他们是在研究一束电子——比巴基球简单得多的物体——如何与镍晶体相互作用。如电子那样的物质粒子像水波那样行为的实验事实，让人憬然醒悟，从而启示了量子物理。由于在宏观尺度下观察不到这类行为，长期以来，科学家对刚好仍能显示这种类波性质的某物可以多大、多复杂感到好奇。如果可以利用人或者河马来演示这个效应，那一定会引起轰动，但正如我们说过的，物体越大则量子效应就越微弱，越不明显。因此，任何动物园的动物都不太可能以类波形式通过它们笼子的栅栏。尽管如此，实验物理学家仍观察到了不断增大尺度的粒子的波动现象。科学家希望有朝一日使用病毒重做巴基球实验，病毒不仅大得多，还被某些人认为是具有生命的东西。



杨实验

从光的波动论看，巴基球条纹并不陌生。

为了理解我们后面几章要作的论证，只需要言及量子物理的一些方面。关键特点之一是波/粒二重性。物质粒子像波那样行为曾使所有人惊讶，而光像波那样行为就不再引起任何人惊讶。光的类波行为对我们似乎是自然的，并且在几乎两个世纪的时间里被认为是接受了的事实。如果你在上面的实验中将一束光照在两道缝隙上，两个波会出现并在屏幕上相遇。它们的波峰和波谷分别在某些点上重合并形成亮斑；在另外一些点上一束波的波峰会和另一束的波谷相遇，把它们对消，而留下暗

的区域。英国物理学家托马斯·杨在19世纪早期进行了这个实验，使人们信服光是波，而非如牛顿曾经相信的，由粒子构成。

尽管人们也许会得出结论说，牛顿说光不是一个波时他是错了，但当他说光能以仿佛它是由粒子组成的那样行为时，他是正确的。我们今天将它们称为光子。正如我们是由大量的原子构成，在日常生活中我们看到的光在这个意义上是复合的，即它是由大量的光子构成——甚至1瓦的夜灯每秒就发射出一百亿亿个光子。单个光子通常是不明显的，但是我们能在实验室产生这么微弱的一束光，它由一串单个的光子组成，我们可以把它当做单个光子来进行检测，正如我们检测单个电子或巴基球那样。而且我们可以利用一束足够稀疏的光来重复杨实验，使得一次只有一个光子到达障碍，在每次到达之间相隔几秒钟。如果我们这么做，然后将所有记录在障碍另一方屏幕上的个别的撞击都加起来，我们就会发现它们一起累积成干涉条纹，这个条纹与我们进行达维孙-泽默实验但用电子（或巴基球）一次射一个到屏幕上所累积的条纹一样。对于物理学家，这是一个令人惊讶的启示：如果单个粒子与其自身相干涉，那么光的波动性质就不仅是一束或一大群光子的性质，而是单个粒子的性质。

量子物理的另一主要信条是由威纳·海森伯在1926年表述的不确定性原理。不确定性原理告诉我们，有一些成对的物理数据，比如一个粒子的位置和速度，我们是没有能力同时测量得精确的。例如，根据不确定性原理，如果你将一个粒子位置的不确定性乘上它的动量（质量乘速度）的不确定性，其结果决不能比某一称为普朗克常数的固定的量更小。这是个绕口令，但可以将其要点叙述如下：你把速度测量得越精确，你就只能把位置测量得越不精确。例如，如果你将位置的不确定性减半，你必须将速度的不确定性加倍。和米、千克、秒这样的日常测量单位相比较，普朗克常数是非常小的，注意到这一点也很重要。事实上，如果以这些为单位，它的值约为6/1000000000000000000000000000000000000000000000。由此，如果你将诸如质量为1/3千克的足球的宏观物体在任何方向都定位在1毫米之内，我们仍能将其速度测量到精度甚至远比每小时亿亿亿分之一米高得多。那是因为，以这些单位测量，足球质量为1/3，而位置不确定性为1/1000。两者都不足以负责普朗克常数的所有那些零，这样责任就落到速度的不确定性上了。但是电子在同样单位下具有0.000000000000000000000000000000000000001的质量，所以对于

电子情况完全不同。如果我们测量一个电子的位置，其精度大约对应于一个原子尺度，不确定性原理要求，我们知道电子的速度，精确度不可能比大约正负每秒1000千米更高，一点也不精确。



“如果这是正确的，那么我们认为是波的东西实际上是粒子，而我们认为是粒子的东西实际上是波。”

根据量子物理，不管我们得到多少信息，也不管我们计算能力有多强，因为物理过程的结果不能无疑地被确定，所以也不能无疑地被预言。相反地，在系统给定的初始状态下，自然通过一个根本不确定的过程来确定它的未来状态。换言之，即便在最简单的情形下，自然也不会要求任何过程或者实验的结果。更确切地说，它允许几个不同的可能结果，每一种结果都具有确定的实现的可能性。用爱因斯坦的话说，仿佛上帝以投骰子来决定每一个物理过程的结果。这个思想使爱因斯坦苦恼，因此尽管他是量子物理的创始人之一，后来却成为它的批评者。

量子物理似乎会削弱自然受定律制约的观念，但事实并非如此。它反而引导我们去接受决定论的新形式：给定系统在某一瞬间的态，自然定律确定各种将来和过去的概率，而非肯定地确定将来和过去。尽管这

不符合某些人的口味，但科学家必须接受和实验相符的理论，而非他们自己的先入为主的观念。

科学所要求的是理论可被检验。如果量子物理预言的概率性质意味着不可能证实那些预言，那么量子理论作为正确理论是不够格的。但是尽管它们的预言仅具概率性质，我们仍然能够检测量子理论。例如，我们能够多次重复一个实验，并且证实不同结果的频率符合预言的概率。想想巴基球实验。量子物理告诉我们，任何东西都不能位于一个确定的点，否则的话，动量的不确定性就会是无限的。事实上，根据量子物理，在宇宙中任何地方都有找到任何粒子的某个概率。这样即便在双缝装置中找到一给定电子的机会非常高，但在半人马座α星，或在你办公室自助餐厅的肉馅土豆饼中，总会有些机会能找到它。由此，如果你把一个量子巴基球踢飞，不管你有多大技巧和知识，都不允许你预先说它将准确地落在何处。但如果你多次重复该实验，你获得的资料就反映出在不同地方找到球的概率，而实验者已经证实这种实验结果和理论预言相一致。

量子物理的概率不像牛顿物理或日常生活中的概率，懂得这一点很重要。将恒定地打到屏幕上的巴基球流注累积的模式与运动员瞄准圆靶上靶心射击累积起的弹孔模式作一比较，可以对此有所理解。除非运动员喝了太多的啤酒，飞镖击中中心附近的机会最大，离中心渐远，概率就减小下来。与用巴基球一样，任何给定的飞镖可到达任何地方，而过一段时间就会出现反映潜伏概率的弹孔的模式。我们在日常生活中可将这情形表达为，一个飞镖具有打到不同点的某一概率；但跟巴基球的情况不同，如果我们那么说，那只是因为我们对其投射条件的知识不完整。如果我们精确地知道运动员投镖的方式，其角度、自旋和速度等，我们就能更好地作出描述。那么，在原则上，我们就能够要多准确就有多准确地预言中镖之处。因此，在日常生活中，我们利用概率的说法来描述事件的结果，非关过程的内禀性质，而只是我们对它的一定方面无知的反映。

量子理论中的概率迥然不同。它们反映了自然中的基本随机性。自然的量子模型包含有不仅与我们日常经验也和我们实在性的直觉概念相矛盾的原理。发现那些原理奇异并难以置信的人不乏知音，包括爱因斯坦甚至费恩曼这样伟大的物理学家，我们很快就要介绍后者对量子论的描述。事实上，费恩曼有一次写道：“我以为我可以有把握地说，没人能

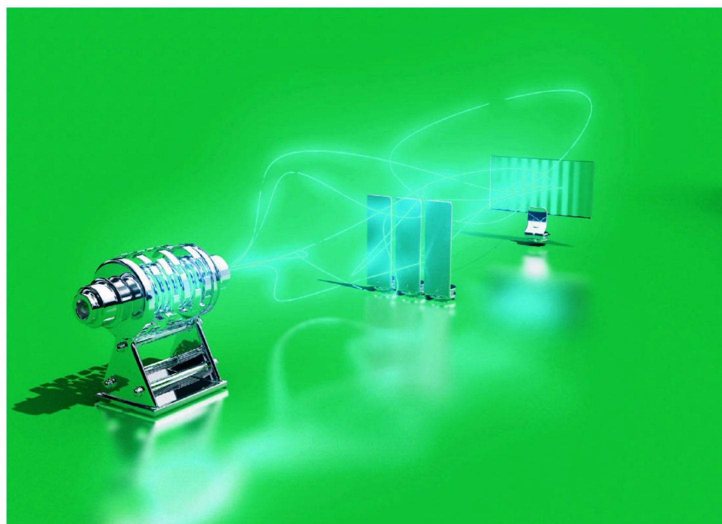
理解量子力学。”但是量子物理和观测相符合。它受到的检验比科学中的任何其他理论都多，但从未失败过。

1940年代，理查德·费恩曼令人惊讶地洞察出量子世界和牛顿世界之间的差别。费恩曼对干涉条纹如何在双缝实验中产生的问题极为好奇。回忆当我们在双缝都打开发射分子时，发现的条纹不是我们做两次实验，一次只让一道缝隙打开，另一次只让另一道缝隙打开，所发现的条纹之和。相反地，当双缝都打开时，我们看到一系列亮暗相间的条纹，后者是没有粒子打到的区域。那意味着，如果比如讲只有缝隙一打开时，粒子就会打到黑条纹的地方，而当缝隙二也打开时，就不打到那里去。看来仿佛是粒子在从源到屏幕的旅途中的某处得到了两道缝隙的消息。这类行为和在日常生活中事物显示的行为方式彻底不同，在日常生活中一个球穿过一道缝隙的路径不受另一道缝隙情形的影响。

根据牛顿物理——如果我不用分子而用足球实验运行的方式——每个粒子都独自遵循着一条明确定义的路径从源达到屏幕。在这个图像中就没有粒子在途中迂回访问每道缝隙邻近的余地。然而，量子模型却说，粒子在它处于始终两点之间的时刻没有明确的位置。费恩曼意识到，人们不必将其解释为这意味着此粒子在源和屏幕之间旅行时没有路径。相反，这可能意味着粒子采取连接那两点的每一条可能的路径。费恩曼断言，这就是使量子物理有别于牛顿物理的缘由。在两个缝隙的情形是要紧的，因为粒子不仅不遵循单一的明确的路径，它取每一条路径，并且同时取这些路径。这听起来像是科学幻想小说，但它不是。费恩曼构想出一个数学表述——费恩曼历史求和——这个表述反映了这一思想，并重现了量子物理的所有定律。数学和物理图像在费恩曼理论中和在量子物理的原先表述中不同，但预言相同。

费恩曼观念在双缝实验中意味着，粒子采取只通过一道缝隙或只通过另一道缝隙的路径；还有穿过第一道缝隙，又穿过第二道缝隙返回来，然后再穿过第一道的路径；访问卖咖喱大虾的饭馆，然后在回来之前，围绕木星转几圈的路径；甚至穿越宇宙再返回的路径。按照费恩曼的观点，这就解释了粒子如何得到关于哪道缝隙开放的信息——如果一道缝隙开放，粒子取穿过它的路径。当两道缝隙都开放时，粒子穿越一道缝隙的路径会和穿越另一道缝隙的路径发生影响，引起干涉。这听起来古怪，但就今日大多数基础物理的目的——以及本书的目的——而言，费恩曼表述已经证明比原先的表述更有用。

费恩曼有关量子实在性的观点对于理解我们即将表述的理论至为关键，因而值得花费一些时间去了解它如何运作。想象一个简单的过程，一个粒子在某一位置A开始自由运动。在牛顿模型中那个粒子将会沿一直线运动。在以后的某个确切时刻，我们将会发现该粒子位于直线上某一确切的位置B。在费恩曼模型中，一个量子粒子体验每一条连接A和B的路径，从每个路径获得一个称为相位的数。相位代表在一个波的循环中的位置，也就是该波在波峰或波谷，或者在它们之间某个确切位置。费恩曼计算那个相位的数学方法显示，当你把从所有的路径的波叠加在一起时，你得到粒子从A开始到达B的“概率幅度”。而概率幅度的平方给出粒子到达B的正确概率。



粒子路径

费恩曼的量子论表述提供了一个图像，为何诸如巴基球和电子等粒子在它们被射出穿过屏幕的缝时形成干涉条纹。

每条对费恩曼求和（也因此对从A走到B的概率）有贡献的个别路径的相，可被设想成具有固定长度但可以指向任何方向的箭头。把两个相位相加，你把代表一个相位的箭头放在代表另一个的箭头的末端，得到的新箭头表示为和。要加上更多相位，你就简单重复这个过程。请注意，当相位排列成行，代表总和的箭头可以非常长。但是如果它们指向不同方向，当你将它们相加时，它们多半抵消，给你余下的箭头没有多长。这个思想图示于下图中。

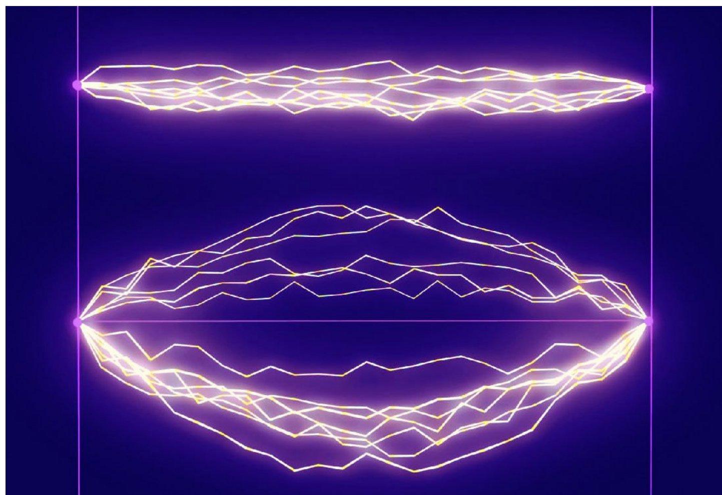
要用费恩曼方法来计算一个始于位置A终于位置B的粒子的概率幅度，你得把连接A和B的每一路径的相关相位或箭头加起来。存在无限多

的路径，这使得数学计算有些复杂，但可以进行。上图画出一些路径。

费恩曼路径求和

由不同的费恩曼路径引起的效应可像波那样相互加强或相互减弱。黄箭头代表相加的相位。蓝线代表它们的和，是一根从第一个箭头的尾到最后一个箭头的点连成的直线。在图中下图中的箭头指在不同方向上，因此它们之和，蓝线非常短。

费恩曼理论给出一个特别清楚的图像，显示如何从量子物理产生一个牛顿世界的图像，尽管前者似乎非常不同。根据费恩曼理论，与每一路径相关的相位依赖于普朗克常数。理论指出，因为普朗克常数如此之小，当你把相互靠近的路径作出的贡献相加时，其相位通常剧烈地变化，这样，正如上图所示，它们多半相加为零。但是理论还指出，存在某些路径，它们的相位具有排列成行的倾向，这样，这些路径是有利的；也就是说，它们对于粒子的被观察行为做出较大贡献。结果是，对于大物体而言，非常类似于牛顿理论预言的路径一定具有相似的相位，而叠加起来对求和给出了最大的贡献。这样仅有的具有有效的大于零的概率的终点正是牛顿理论预言的那个，而该终点的概率非常接近于1。因此大物体恰如牛顿预言的那样运动。



从A到B的路径

两点之间的“经典”路径是一直线，接近经典路径的相位倾向于相互加强，而离开它较远的路径的相位倾向于相互抵消。

迄今为止我们讨论了在双缝实验背景下的费恩曼观念。在该实验中粒子被射向带有缝隙的墙，我们在置于墙后的屏幕上测量粒子结束行程的位置。更一般地说，费恩曼理论允许我们预言的不仅仅是一个单独粒子，而且是一个“系统”的可能结果，该系统可以是一个粒子，一组粒子，甚或整个宇宙。在系统的初始态和后来我们对其性质的测量之间，那些性质以某种方式演化，物理学家将其称为该系统的历史。例如，在双缝实验中，粒子的历史就是它的路径。正如对于双缝实验，观察粒子到达任何给定的点的机会依赖于能把它弄到那里的所有路径。费恩曼指出，对于一个一般系统，任何观察的概率由所有可能将其导致那个视察的历史构成。正因为如此，他的方法被称作量子物理“历史求和”或者“可择历史”表述。

既然我们对费恩曼的量子物理方法已经有了点感觉，现在该来研究我们将来要用到的另一关键的量子原理——观测系统必然改变其过程的原理。我们难道不能小心地看着而不去干预吗，正如我们当导师在她的下颌上有点芥末时那么做的？不能。根据量子物理，你不能“只”观察某物。也就是说，量子物理承认，进行一次观测，你必须和你正观测的对象相互作用。例如，在传统意义上去看一个物体，我们就把光照在它上面。把光照在南瓜上当然对它只有微小的效应。但是哪怕将一道微弱的光照射到极小的量子粒子——即把光子打到它上面——也会有可觉察的效应，而且实际表明它正好以量子物理描述的方式改变实验结果。

正如以前那样，假定我们在双缝实验中向障碍发出一束粒子，并且在首批百万个粒子通过时收集数据。我们画出粒子到达不同的检测点的数目时，这数据会形成在第55页画出的干涉条纹，而且当我们将从粒子的出发点A到其检测点B的所有可能路径所涉及的相叠加起来，我们会发现我们计算的在不同点到达的概率和那个数据一致。

现在假定我们重复实验，这回把光照到缝隙上，这样我们知道粒子通过的居间的点C（C是两缝隙中的任一道的位置）。这叫做“哪条路径”信息，因为它告诉我们每个粒子是从A通过缝隙一到达B呢，还是从A通过缝隙二到达B。由于我们现在知道每个粒子通过哪条缝隙，在我们为该粒子求和中的路径现在只包含那些或通过缝隙一的途径，或通过缝隙二的途径。它将永不同时把通过缝隙一的路径和通过缝隙二的途径包括进去。因为费恩曼是这样解释干涉条纹的，他说通过一条缝隙的路径与通过另一条的路径相干涉，因此如果你开灯确定粒子通过哪条缝隙，由此消除了其他的选择自由，你就会使干涉条纹消失。的确，当实验在进行时，开灯使结果从第55页上的干涉条纹变成像第54页上的条纹！此外，我们能够利用非常弱的光去变更实验，使得并非所有粒子都和光相互作用。在那种情形下，我们只对粒子的某一子集得到其走哪条路径的信息。那么，如果我们根据是否得到哪条路径信息而把粒子到达的数据分开，我们发现，我们对之没有哪条路径信息的子集，其数据将形成干涉条纹，而我们对之拥有哪条路径信息的子集，其数据将不显示干涉。

这个观念对我们“过去”的概念有重要的含义。在牛顿理论中，过去被假定是作为确定的事件系列而存在。如果你看到去年在意大利买的花瓶摔碎在地上，而你的学步小童羞怯地站立于旁，你可回溯导致灾祸的事件：小小指头松开，花瓶落下并撞在地上粉碎成千百片。事实上，给定关于此刻的完全数据，牛顿定律允许人们计算出过去的完整图像。这和我们的直观理解是一致的，不管痛苦还是快乐，世界都有一确定的过去。也许从未有人看到过，但是过去存在之确实，犹如你为它拍了一系列快照。然而，不能说量子巴基球从源到屏幕飞过了确定的路径。我们可以因观测巴基球而确定它的位置，但在我们观测的空档，它飞过所有的路径。量子物理告诉我们，不管我们现在多么彻底地进行观测，（不被观测的）过去，正如将来一样是不确定的，只能作为一带可能性谱系而存在。根据量子物理，宇宙并没有一个单一的过去或者历史。

过去没有确定的形状，这一事实意味着你现在对一个系统进行的观

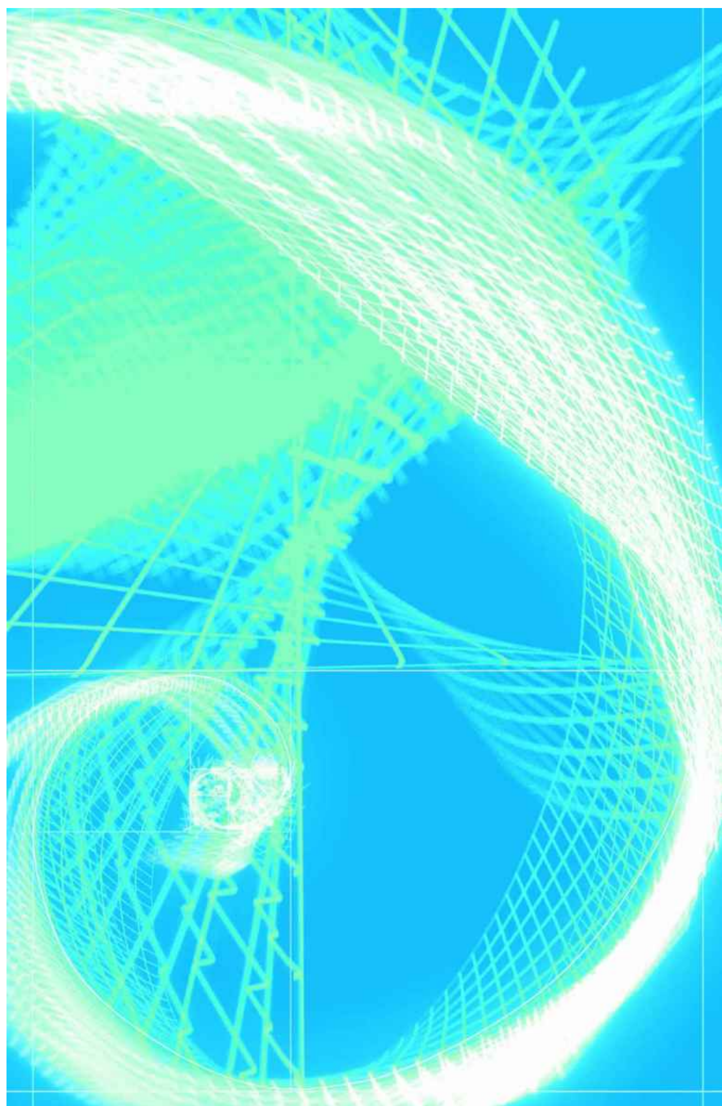
测影响它的过去。物理学家约翰·惠勒想出一种称作延迟选择的实验，该实验相当出人意外地使上面的观点引起注意。概括地讲，延迟选择实验就像我们刚刚描述的双缝实验，只不过在那里你有观测粒子走过的路径的选择自由，而在延迟选择实验中，你一直推迟到粒子打到检测屏幕前的那一瞬间再决定是否去观测。

延迟选择实验得到的结果，和当我们由看缝隙本身选择去注意（或不注意）哪条路径信息而得到的结果一样。但是在这个情形下，每个粒子采取的路径——即它的过去——是在它通过缝隙之后很久才确定的，大概粒子在此前就应“决定”，它是否只穿过一道缝隙不产生干涉，或者穿过两道缝隙产生干涉。

惠勒甚至考虑该实验的一个宇宙学版本，涉及的粒子是从几十亿光年外的强大的类星体发射出来的光子。处于类星体和地球之间的星系的引力透镜效应可把这种光分成两条光路并朝地球重新聚焦。尽管当代技术做不了这个实验，如果我们能从这光中收集到足够的光子，它们应能形成干涉条纹。但如果我们在检测之前不久用一个装置去测量哪条路径信息，那个条纹就应消失。在这种情形下，走一条或双条路径的选择应在几十亿年前，也即在地球甚至我们的太阳形成之前，就应该已经被做出了，然而我们在实验室的观测却可以影响那个选择。

在本章中，我们利用双缝实验阐述了量子原理。以下，我们会将量子力学的费恩曼表述应用到宇宙整体。我们将会看到，宇宙正如粒子一样，并没有一单个历史，而是具有每一可能的历史，每个历史都具有自身的概率；而且我们对其现状的观测会影响它的过去并确定宇宙的不同历史，正如同在双缝实验中观察粒子会影响到粒子的过去。这个分析将指出，我们宇宙中的自然定律如何由大爆炸呈现。但是，在我们考察定律如何呈现之前，我们将稍稍涉及那些定律是什么，以及它们引出的某些奥秘。

第五章　万物理论



宇宙最不可理解之处是它是可理解的。

——阿尔伯特·爱因斯坦

因为宇宙由科学定律制约，也就是说，它的行为是可以被做成模型，所以说是可理解的。但是，这些定律或者模型是什么呢？引力是用

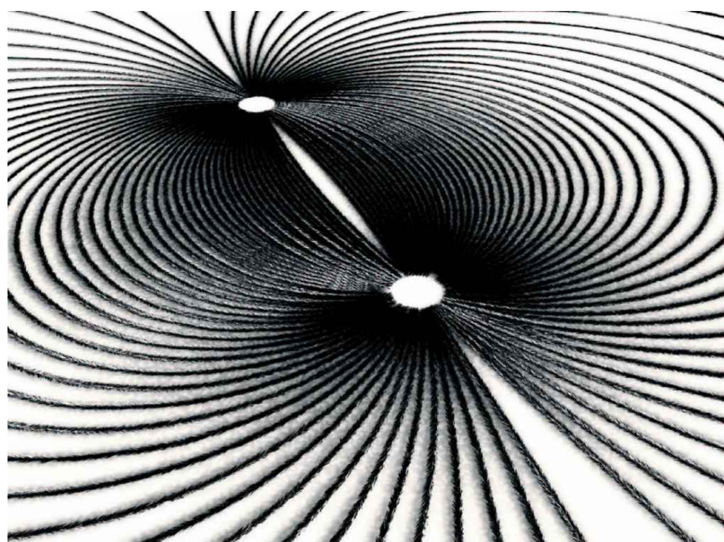
数学语言描述的第一种力。牛顿的引力定律发表于1687年，它指出宇宙中的每个物体都吸引任何其他物体，其吸引力和它的质量成正比。因为它首次展示了，至少宇宙的一个方面可被精确地做成模型，而且它还为此建立了数学体系，所以给那个时代的智慧生活留下深刻的印记。存在自然定律的观念提出了和大约50年前伽利略被裁决为异端类似的问题。例如，旧约里的故事说，约书亚祈祷上帝让日月止步，使之有额外长的白昼，让他得以在迦南结束对亚摩利人的战争。根据约书亚记，太阳静止不动了大约一天。我们今天知道，那就意味着地球停止转动。如果地球停下，那么根据牛顿定律，任何未被束缚的东西都会以地球原先的速度（在赤道处是每小时1100英里）保持运动——为了延迟日落要付出很高代价。牛顿本人对此毫不在乎，正如我们说过的，牛顿相信上帝能够并确实干涉宇宙的运作。

电力和磁力是其定律或模型被发现的宇宙的第二个方面。这些力的行为类似引力，但具有重大差别，两个同性的电荷或同性的磁极互相排斥，而异性的电荷或异性的磁极相互吸引。电磁力比引力强烈得多，但因为宏观物体包含几乎等量的正负电荷，所以我们在日常生活中通常觉察不到它们。这意味着，两个宏观物体之间的电磁力几乎被完全相互抵消，而不像引力那样，全部叠加。

我们现在电学和磁学的观念是在18世纪中期到19世纪中期的大约100年间发展起来的，那时几个国家的物理学家对电磁力进行了仔细的实验研究。其中一个最重要的发现是电力和磁力是相互关联的：一个运动的电荷对磁铁施力，而一个运动的磁铁也对电荷施力。丹麦物理学家汉斯·克里斯蒂安·奥斯特首先意识到其间存在某些关联。1820年，奥斯特在大学准备讲演时注意到，从他使用的电池释放出的电流引起邻近的指南针转向。他很快意识到运动的电荷产生磁力，并创造了新词“电磁”。几年之后，英国科学家迈克尔·法拉第推断——以现代术语表达——如果电流能引起磁场，那么磁场也应能产生电流。他于1831年展示了这个效应。14年后，法拉第发现了强磁性会影响极化光的性质，于是又发现了电磁和光之间的联系。

法拉第只受过很少的正规教育。他出生于伦敦附近的一个穷铁匠家里，13岁辍学，在书店打杂，也干装订工。年来年去，竟从本来要他摆弄的书本里接触了科学，也在闲暇时进行简单而便宜的实验，边做边学。他最终在伟大的化学家汉弗利·戴维爵士的实验室中当上了助手。法

拉第在那里度过生命中余下的45年，并在戴维死后继承其位。法拉第在数学方面有困难，而且终其一生对数学所知甚少，所以对他而言，为在自己实验室里观察到的奇特的电磁现象构想出理论图像，无疑是一场搏斗。尽管如此，他还是成功了。



力场

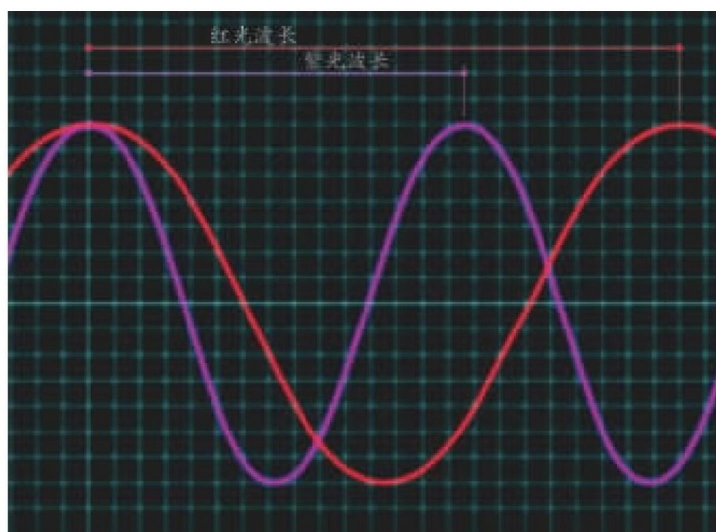
磁铁棒的力场，正如铁末的反应所图解的。

法拉第最伟大的智慧创新之一是力场的观念。这个时代，多亏有关眼球突出的外星人及其星际飞船的书籍和影片，大多数人已熟悉这术语，这样也许他应得到版税。但是在牛顿和法拉第之间的几个世纪中，物理学的最大奥秘之一是，物理定律仿佛指明，力越过将相互作用的物体间隔开来的空虚的空间而发生作用。法拉第不喜欢这个，他相信，要移动一个物体，必须让某种东西和它接触，这样他想象在电荷和磁铁之间的空间充满了看不见的管子，这些管子实实在在地在进行推拉。法拉第把那些管子称作力场。想象力场的一种好方法是进行教室演示，把一块玻璃板放在磁铁棒上，在玻璃上撒开铁屑。为了克服摩擦只要轻敲几下，铁屑犹如被看不见的力量轻推而移动，将自己按一种弧线条纹排列，这弧线从磁铁的一极伸展到另一极。那些条纹是穿透空间看不见的磁力的一张地图。现在我们相信，所有的力都由场来传送，因此它是现代物理，也是科幻小说的一个重要概念。

几十年间，我们对电磁学的理解停滞不前，总共不过是一些经验定律的知识：电和磁紧密但神秘相关的暗示；它们和光有某种联系的见

解；以及场的萌芽概念。至少存在11种电磁理论，每一种都有瑕疵。然后，在1860年代的几年间，苏格兰物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦将法拉第思想发展成一个数学框架，解释了电、磁和光之间的本质的神秘关系。其结果是一组方程，它们把电力和磁力都描述成同一物理实体即电磁场的表现。此外，他还证明了，电磁场能够作为波通过空间传播。波速是由出现在他方程中的一个数制约的，他从早几年测量过的实验数据计算出这个数。令他惊异的是，计算出的速度等于光速，那时已知的光速在实验上精确到1%。他发现了光本身就是一种电磁波！

今天描述电磁场的方程被称作麦克斯韦方程。很少有人听说过它们，但它们也许是我们知道的在商业上最重要的方程。它们不仅制约从家电到电脑的一切运行，还描述除了光之外的波，诸如微波、射电波、红外光和X射线。所有这些和可见光只在一个方面有差别——它们的波长。射电波的波长为1米或更长，可见光波长为千万分之几米，而X射线的波长比亿分之一米还短。我们的太阳在所有波长上都辐射，但是其辐射强度在我们可见的波长上最大。我们用肉眼能看到的波长是太阳最强烈辐射的那些，这也许不是碰巧：很可能正是因为这恰好是肉眼获得最大的辐射范围，所以我们的肉眼演化成具有检测该辐射范围的能力。如果我们遇到其他行星来的生物，他们也许能“看”到在他们自己的太阳最强烈发射的无论什么波长上的辐射，这种辐射受到在他们行星大气中诸如灰尘和气体的遮光特性的因素的调制。这样，在X射线存在下演化的外星人从事机场安检可以非常称职。



波长

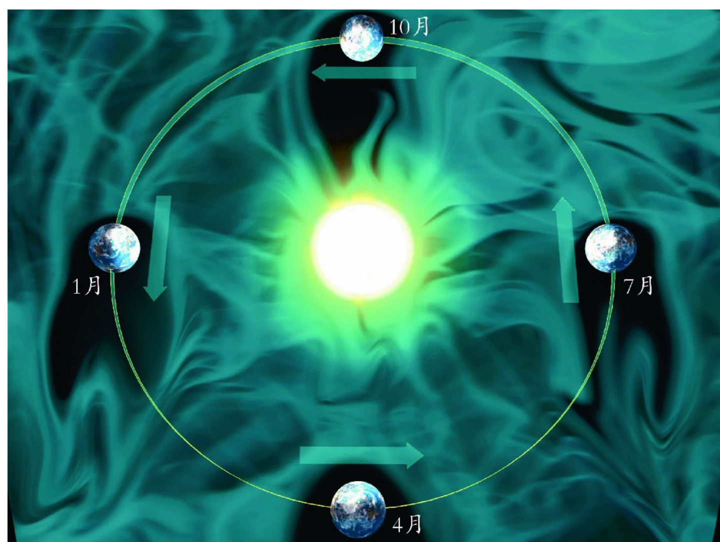
微波、射电波、红外光、X射线——以及不同颜色的光——只是在波长上不同。

麦克斯韦方程要求电磁波以大约每秒30万千米或者约每小时6.7亿英里的速度行进。但是除非你能指明一个参照系，相对于这个参照系来测量这个速度，否则引述一个速度没有任何意义。这不是你在平时通常需要考虑的问题。当速度限制标志写着每小时60英里时，那是指你的速度是相对于路，而不是相对于银河系中心的黑洞来测量的。然而，即便在日常生活中也存在你要考虑参照系的场合。例如，如果你手持一杯茶在飞行中的喷气式飞机过道走动，你会说你的速度是每小时2英里。然而地面上的某人会说，你正在以每小时572英里的速度运动。为了避免你以为那些观察者中的一位或另一位更有权拥有真理，记住因为地球围绕着太阳公转，而某位从那个天体表面看着你的人会和你们两位的意见都不一致，并且说你大约以每秒18英里的速度运动，更不用说嫉妒你的空调了。根据这种分歧，当麦克斯韦宣布发现从他的方程涌现出“光速”时，就自然地产生了问题：麦克斯韦方程中的光速是相对于什么而测量的？

没有理由相信麦克斯韦方程中的速度参数是相对于地球测量的速度。他的方程毕竟适用于整个宇宙。有一时期被考虑到的另外一种答案是，他的方程指明的光速是相对于一个之前未被检测出来的穿透整个空间的媒质。这个媒质被称为传光的以太，或者简单地就称为以太。这是亚里士多德相信充满地球之外的整个宇宙的物质，而为它取的术语。电磁波通过其中传播的媒质可能就是这种假定的以太，正如声音通过空气传播一样。如果以太存在的话，就有一个静止（那就是相对于以太静止）的绝对标准，并因此也存在一个定义运动的绝对方式。以太就会为整个宇宙提供一个优越的参照系，相对于它可测量任何物体的速度。这一来就从理论的依据假定了以太的存在，并使一些科学家去寻找一种研究它的方法，或者至少去确认其存在。其中的一位科学家便是麦克斯韦本人。

如果你朝着声波穿越空气疾走，波就较快地向你接近，而如果你疾走离开，波就较慢地向你靠近。类似地，如果存在以太，光速就会依你相对于以太的运动而变化。事实上，如果光的行为和声一样，正如搭乘超音速喷气式飞机的人永远听不到从飞机后面来的任何声音，因而足够快穿越以太运动的旅客也能够跑得比光波更快。从这类考虑开始研究，麦克斯韦建议一个实验。如果存在以太，那么在地球围绕太阳公转时，它必定穿越它运动。并且由于地球在1月份行进的方向与在4月或7月相

比有所不同，人们应能观测到在一年的不同时期光速的微小差别——见下图。



在以太中运动

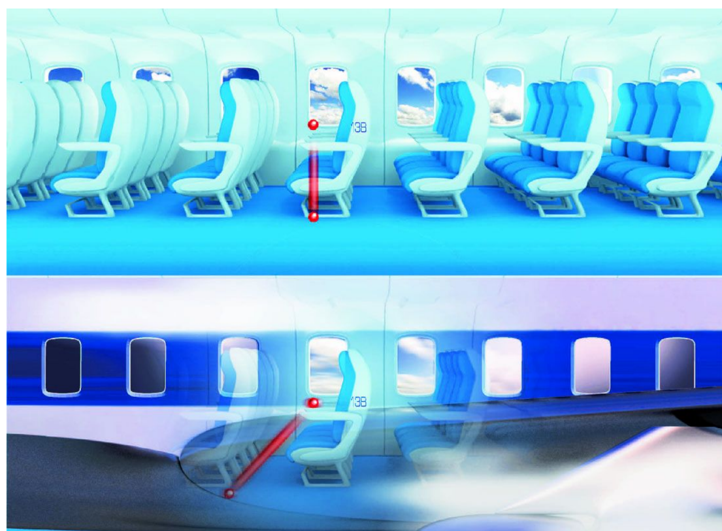
如果我们在以太中运动，我们应能由观测光速的季节不同而检测到那个运动。

皇家学会会刊的编辑说服麦克斯韦不要发表他的思想，他认为该实验行不通。1879年，麦克斯韦死于痛苦的胃癌，享年48岁。之前不久，麦克斯韦就这个主题致信一位朋友。这封信在他死后发表于《自然》杂志。一位名叫阿尔伯特·迈克耳孙的美国物理学家是此文的读者之一。从麦克斯韦的猜测获得灵感，迈克耳孙和爱德华·莫雷于1887年作了一个非常灵敏的实验，以测量地球穿越以太的速度。他们的想法是比较两个成直角的不同方向的光速。如果相对于以太的光速是一个固定的数，那么测量就应该揭示出依光束方向而不同的光速。但他们没观测到这种差别。

迈克耳孙和莫雷实验的结果很显然与电磁波通过以太传播的模型相冲突，因而本应该把以太模型抛弃掉。但是迈克耳孙的目的是测量地球相对于以太的速度，不是去证明或证伪以太假设，而他的发现并没有使他得出以太不存在的结论，也没有其他人得出这个结论。事实上，1884年著名的物理学家威廉·汤姆孙爵士（开尔文勋爵）说：“以太是动力学中我们确信的仅有物质。有件事物我们确信无疑，那就是传光以太的实在性和本体性。”

你怎能不顾迈克耳孙-莫雷实验结果还继续确信以太呢？正如我们说过的，经常发生的事是，人们利用不自然的特别的附加物试图挽救模型。有些人假定地球拖曳以太跟着它走，这样我们实际相对于它没有运动。荷兰物理学家亨德利克·安东·洛伦兹和爱尔兰物理学家乔治·弗朗西斯·菲兹杰拉德提出，在一个相对于以太运动的参照系中，也许由于某种未知的机械效应，钟会变慢而距离会缩短，所以人们仍然测得光具有相同速度。这种挽救以太概念的努力几乎继续了20年，直至伯尔尼专利局的一位年轻不知名的职员阿尔伯特·爱因斯坦发表一篇非凡的论文。

当爱因斯坦于1905年发表他的题为“论动体的电动力学”的论文时，他才26岁。在该论文中，他做了一个简单的假设：物理定律，尤其是光速，对于所有匀速运动的观察者都应该显得相同。后来证明，这个观念需要我们有关空间和时间的概念来一番变革。为了知道原由，想象两个在喷气式飞机的相同地方但在不同时刻发生的事件。对一位在飞机上的观察者而言，那两个事件之间具有零距离。但是对于在地面上的第二位观察者，这两个事件被分开的距离是飞机在两个事件之间的时间里旅行的距离。这显示了，两位相对运动的观察者在两事件的距离上意见不同。



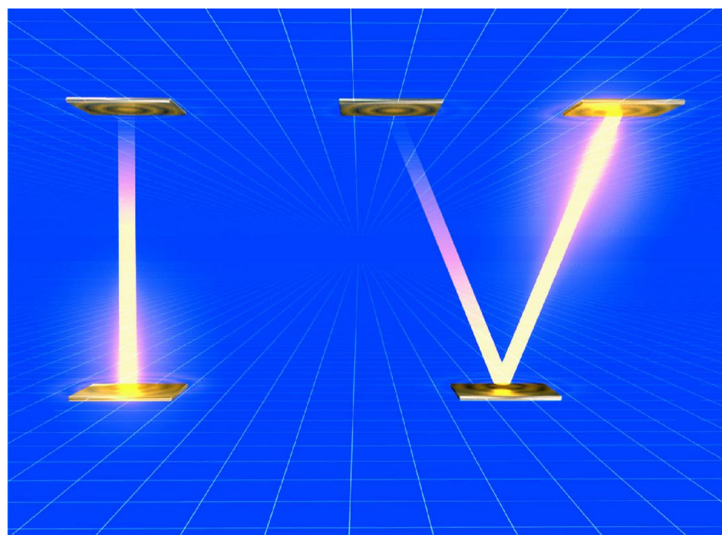
空运喷气机

如果在喷气机上拍球，搭飞机的观察者会确定，球在每一次弹跳后都落在同一点，而在地面的观察者会在弹跳点中测量到大的差别。

现在假定这两位观察者观察从机尾向机头行进的一个光脉冲。正如

在上例中所说的，对于光从机尾被发射直至在机头被接收行进的距离，两人意见不一致。由于速度是行进距离除以所用的时间，这意味着如果他们在脉冲行进的速度——光速——上意见一致，他们就对在发射和接收之间的时间间隔上意见不一致。

使事情变得奇怪的是，尽管两位观察者测得不同的时间，他们却在看相同的物理过程。爱因斯坦没有企图为此建立一个人为的解释。他得出一个惊人但却符合逻辑的结论：花费时间的测量，正如旅行距离的测量，依赖于进行测量的观察者。这个效应是爱因斯坦1905年论文中的理论关键之一，这个理论人称狭义相对论。



时间延缓

运动钟表似乎走得慢。因为这也适合于生物钟，因此运动的人似乎会更慢地变老，然而你不要抱奢望——在日常速度下，没有正常的钟表能测量出这个差别。

如果我们考虑两位观察者看着一个钟，我们就能看到这个分析如何应用于计时仪器。狭义相对论认为，相对于钟静止的观察者，钟走得较快。对于相对于钟非静止的观察者，钟走得较慢。如果我们将一束从机尾向机头行进的光脉冲比作钟表的“滴答”声，我们将看到，对于一位地面上的观察者该钟走得较慢，因为光束在那个参照系中必须行进较大的距离。但这个效应与钟的结构无关；它对所有的钟，甚至我们自己的生物钟都成立。

爱因斯坦的研究表明，正如静止的概念，时间也不能是绝对的，像牛顿以为的那样。换言之，不可能赋予每一个事件每位观察者都同意的

时间。相反地，所有的观察者都有他们自己的时间测量，而两位相互运动的观察者测量的时间一定不一致。爱因斯坦观念和我们的直觉背道而驰，因为在我们日常生活中正常遭遇的速度上，这些观念所意味的效应是不能被觉察到的。但是这些效应已再三地被实验确认。例如，想象一台静止地处于地球中心的参考钟，另一台钟处于地球表面，而第三台钟搭乘飞机，或者顺着或者逆着地球旋转的方向飞行。参照处于地心的钟，搭向东飞行的飞机——沿着地球旋转的方向——的钟比在地球表面上的钟运动得快，这样它应该走得较慢。类似地，参照处于地心的钟，搭着向西飞行的飞机——逆着地球旋转的方向——的钟比在地球表面上的钟运动得较慢，所以应走得较快。这正是在1971年10月进行的一次实验中所观察到的，在该实验中让一台非常精密的原子钟围绕着地球飞行。这样你可以不断绕着地球往东飞行，由此延长你的生命，尽管你也许会对所有那些航线上的电影感到厌烦。然而，这效应非常小，每绕一圈大约为亿分之十八秒（而且这还由于引力差异的效应而有所减少，但是我们在此不必讨论这个）。

由于爱因斯坦的研究，物理学家们意识到，因为要求光速在所有参照系中相同，麦克斯韦的电磁学理论就要求，时间不能视为与三维空间分离。相反，时间和时间是相互纠缠的。这有点像把将来/过去的第四个方向加到通常的左/右、前/后和上/下去。物理学家将空间和时间的这种结合称为“时空”，而且因为时空包括一个第四方向，他们称之为第四维。在时空中，时间不再和三维空间分离，而且，粗略地讲，正如左/右、前/后或上/下的定义依赖于观察者的方向，时间的方向也随观察者的速度而变化。以不同速度运动的观察者会在时空中选择时间的不同方向。因此爱因斯坦的狭义相对论是一个新模型，它摆脱了绝对时间和绝对静止（也就是相对于固定的以太的静止）的概念。

爱因斯坦很快意识到，要使引力和相对论相互协调，还必须做另一个改变。根据牛顿的引力论，在任何时刻，物体都以依赖于它们之间在那个时刻的距离的一个力相互吸引。可是，相对论已经废除了绝对时间的概念，这样就没办法规定何时去测量物体之间的距离。这样牛顿引力论和狭义相对论就不能协调，所以必须修正。这个冲突也许听起来仅像是技术上的困难，也许甚至不过是不必太多改变理论就能被迂回解决的细节。结果表明，这种想法完全错了。

其后的11年间，爱因斯坦发展了引力的新理论，他称之为广义相对

论。广义相对论中的引力概念和牛顿的截然不同。相反地，它是基于革命性的设想：时空不像原来以为的那样是平坦的，而是被处在其中的质量和能量弯曲或变形。

考虑地球表面是一种想象曲率的好办法。尽管地球表面仅仅是二维的[因为沿着它只有两个方向，比如说北/南和东/西]。但因为去想象弯曲的二维空间比弯曲的四维空间容易，所以我们准备将它作例子。像地球表面这样的弯曲表面的几何不是我们熟悉的欧氏几何。例如，在地球表面上，两点之间最短的距离——我们知道在欧氏几何中是条直线——是沿着连接这两点的所谓大圆的路径。（大圆是地球表面上任一个以地心为中心的圆。赤道是大圆的一个例子，赤道沿着不同直径旋转得到的任何圆也是大圆。）

比如，想象你要从纽约飞往马德里，这是两座几乎处于同纬度的城市。如果地球是平坦的，则最短的路线就是一直往东的。如果你这么做，那么你将在旅行3707英里后到达马德里。然而，由于地球的曲率，存在着一条路线，在平坦地图上看起来显得弯曲并因此较长，但是其实较短。如果你沿着这大圆的路线，可以只飞3605英里就到达那里，那就是首先往东北方向，然后逐渐往东，接着再往东南。在这两条路线之间的距离差异，是由曲率引起的，曲率是地球表面非欧几何的一个标志。航空公司知道这个，并安排其飞行员只要可行就沿着大圆的路线飞。

根据牛顿运动定律，一切物体，诸如炮弹、新月形面包和行星等，除非受到外力，比如引力的作用，则都沿直线运动。但是在爱因斯坦理论中，引力是一种不像其他力的力；毋宁说，它是质量使时空变形、产生曲率的结果。在爱因斯坦理论中，物体沿测地线运动，那是在弯曲空间中最接近直线的东西。在平面上直线是测地线，在地球表面上大圆是测地线。在没有物质时，四维时空中的测地线对应于三维空间的直线。然而，当物质存在时，它变形时空，物体在相应的三维空间中的路径以一种在牛顿理论中被解释成引力吸引的方式弯曲。当时空不平坦时，物体的路径显得被弯折，给人的印象就如一个力作用在它们之上。

在没有引力时，爱因斯坦的广义相对论重现狭义相对论，而且在我们太阳系的弱引力环境中它作出和牛顿引力论几乎相同的预言——但不完全相同。事实上，如果在全球定位卫星导航系统中不考虑广义相对论的效应，则全球位置的误差就会以大约每天10千米的速率积累！然而，广义相对论的真正重要性并非在于应用它发明了某种仪器引导你去新饭

店，而在于它是宇宙的非常不同的模型，该模型预言诸如引力波和黑洞的新效应。就这样，广义相对论将物理学转变成了几何学。现代技术足够灵敏，允许我们对广义相对论进行许多微妙检验，而它通过了所有的检验。



测地线

在地球表面上两点之间的最短距离，当画在一张平面地图上时，显得是弯曲的——记在心里若有机会进行一次严肃的检验。

尽管麦克斯韦电磁学理论和爱因斯坦的引力论——广义相对论都变革了物理学，但它们和牛顿的物理学一样，都还是经典理论。那就是说，它们是宇宙在其中可以具有单一历史的模型。正如我们在上一章中看到的，这些模型在原子和亚原子水平上与观测不相符合。相反地，我们必须使用量子论。在量子论中，宇宙可具有任何可能的历史，每个历史都具有自己的强度或概率幅度。对于牵涉日常世界的实用计算，我们能继续使用经典理论，然而如果我们希望理解原子和分子行为，我们便需要麦克斯韦电磁理论的量子版本；而如果我们要理解早期宇宙，那时宇宙中的所有物质和能量都被挤压到极小体积中，我们就必须拥有广义相对论的量子版本。我们需要这样的理论，还因为如果我们要寻求对自然的根本理解，若某些定律是量子的，而其他是经典的话，就将是不一致的。因此我们必须寻找所有自然定律的量子版本，这样的理论被称作量子场论。

已知的自然力可分为4类：

1.引力。这是4种力中最弱的力，但它是长程力，并且作为吸引力作用于宇宙中的万物。这意味着，对于大物体而言，所有引力都叠加起来，并且能够支配其他所有的力。

2.电磁力。这也是长程的，并且比引力要强得多，但是它只作用在

带电荷的粒子上，它在同种电荷之间是排斥的，而在异种电荷之间是吸引的。这意味着大物体之间的电力相互抵消掉，但它们在原子分子尺度起支配作用。电磁力决定着全部化学和生物学过程。

3.弱核力。这力引起放射性，并在恒星以及早期宇宙中的元素形成中起极其重要的作用。然而在日常生活中，我们不接触这个力。

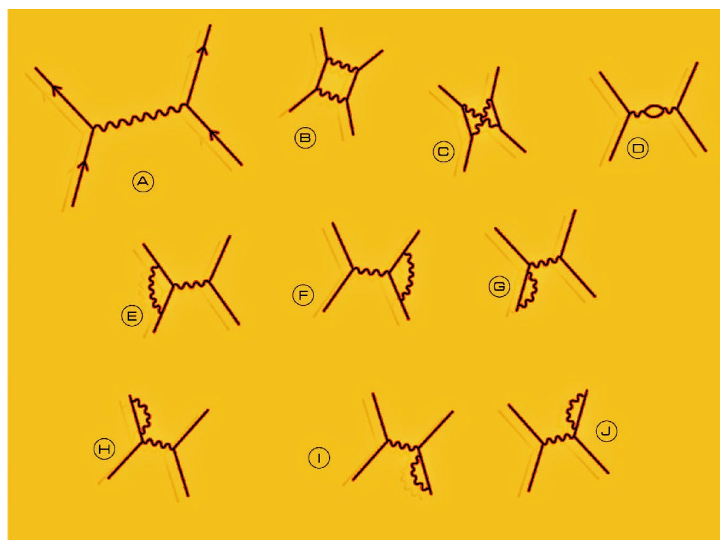
4.强核力。这力把原子核中的质子和中子束缚在一起。它还把质子和中子自身束缚住，因为它们是由更微小的粒子，即我们在第三章中提到的夸克构成，所以它是必要的。强力是太阳和核动力的能源，但是，正如弱力一样，我们与它没有直接的接触。

第一种有了量子版本的力是电磁力。电磁力的量子理论，称作量子电动力学，或简称为QED，是1940年代由理查德·费恩曼和其他人发展的，它已成为所有量子场论的一个模型。正如我们说过的，根据经典理论，力是由场来传递的。但在量子场论中，力场被描绘成由称作玻色子的各种基本粒子构成，玻色子是在物质粒子之间来回飞行，携带并传递力的粒子。物质粒子叫费米子，电子和夸克是费米子的例子。光子或者光的粒子，是玻色子的例子。正是玻色子传送电磁力。所发生的是一个物质粒子，比如电子，发射出一个玻色子或者力粒子，引起回弹，非常像发射炮弹时引起的大炮回弹一样。然后力粒子和另一个物质粒子碰撞并被吸收，改变了那个粒子的运动。按照QED，在带电粒子——感受到电磁力的粒子——之间的所有相互作用都按照光子的交换来描述。

QED的预言已被检验并发现很精确地符合实验结果。但是进行QED所需的数学计算会很难。正如我们下面将要看到的，问题在于当你对上面粒子交换框架加上量子论的要求，即人们包括相互作用能发生的所有历史——例如，所有力粒子能被交换的方式——数学就变得复杂了。幸运的是，费恩曼除了发现可择历史的概念——在前一章中描述的考虑量子论的方法——还研究出解释不同历史的优雅的图解方法，今天该方法不仅应用于QED，而且应用于所有的量子场论中。

费恩曼图解方法提供一种摹想历史求和中的每一项的方法。那些称为费恩曼图的图画是现代物理最重要的工具之一。在QED中，对所有可能历史的求和可表示为像对如下那些费恩曼图的求和，它们表示两个电子通过电磁力相互散射的某些可能的方式。这些图中的实线代表电子，而波线代表光子。时间被认为是从底部往顶部前进，而线的会合处对应

于光子被一个电子发射或吸收。图AAA代表两个电子相互接近，交换一个光子，然后继续前进。那是两个电子间发生电磁作用的最简单的方式，然而我们必须考虑所有可能的历史。因此我们还应把像图BAA这样的图包括进去。那个图也画出两条线进来——正接近的电子——两条线离开——被散射的电子——但在这幅图中，当电子飞离之前交换两个光子。画在这里的图只是一些可能性；事实上，存在无限数目的图。这些都必须用数学表达出来。



费恩曼图

这些图是两个电子相互散射的过程。

费恩曼图不仅是想象和分类相互作用如何发生的优雅方法。该图还附有允许你从每个图的线和顶点得出数学表达式的规则。例如，具有某给定初始动量的入射电子变成具有某个特别的最终动量飞离的概率，那是由对每一幅费恩曼图的贡献求和得到的。正如我们说过的，因为这些图的数目无限多，所以要花一些功夫。此外，尽管射入和射出的电子被赋予了确定的能量和动量，在图内部的闭圈的粒子可具有任意的能量和动量。这一点是重要的，因为在进行费恩曼求和时，人们不仅要对所有的图求和，而且还要对所有的那些能量和动量值求和。

费恩曼图为物理学家在想象和计算由QED描述的过程的概率提供了巨大的帮助。然而，它们不能治疗此理论患上的重要毛病。当你把无数不同历史的贡献叠加起来，就会得到无限的结果。（如果在一个无限求和中相继的项减小得足够快，和就可能是有限的，可惜，这里情况并非

如此。）特别是，当把费恩曼图加起来时，其答案似乎表明电子具有无限质量和电荷。这是荒谬的，因为我们能够测量质量和电荷，而它们是有限的。为了处理这些无限，人们发展了一个称为重正化的步骤。



费恩曼图

理查德·费恩曼驾驶一辆上面画着费恩曼图的著名的面包车。这个艺术家描画的是用来显示上面讨论的图。尽管费恩曼于1988年去世，这面包车仍在——储藏在南加州的加州理工学院附近。

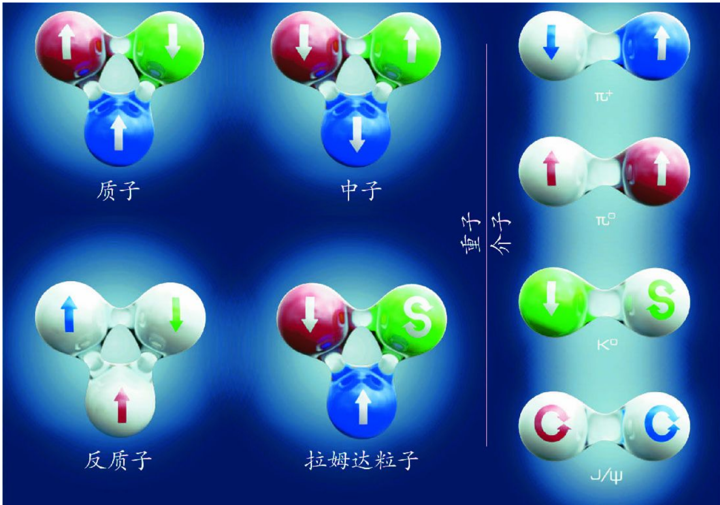
重正化的过程牵涉到减掉一些量，这些量以这样的方式被定义成无限的负的，使得在仔细的数学计算后，负无限的值与理论中产生的正无限的值的和几乎完全对消，留下一个小余量，即质量和电荷的有限的观察值。这些操作可能听起来有点像使你中学数学考试不及格的东西，而重正化，正如听起来的那样，的确在数学上是可疑的。一个推论是这个方法得到的电子质量和电荷值可取任意的有限值。其优点是物理学家可选择负无限以得出正确的答案，但缺点是因此从理论不能预测出电子质量和电荷。然而，一旦我们用这种方法固定了电子的质量和电荷，就可以利用QED去做其他许多非常精确的预言，所有这些预言都和观测极其接近地一致，于是，重正化就成为QED的一个重要部分。例如，QED早期的一个胜利是正确地预言了所谓的兰姆移动，那是1947年发现的氢原子一个态的能量的微小改变。

QED中重正化的成功鼓励了寻找描述其他3种自然力的量子场论的尝试。然而，将自然力分成4种也许是人为的，而且是我们缺乏理解造成的。因此人们寻找一种万物理论，它能够将4类力统一到一种与量子

论相和谐的单一定律中。这将是物理学的圣杯。

从弱力理论得到统一是正确方法的一个迹象。只描述弱力自身的量子场论是不能重正化的；也就是说，它具有不能由减去有限个如质量和荷的量来对消的无限。然而，阿伯达斯·萨拉姆和史蒂芬·温伯格于1967年各自独立地提出一个理论，在该理论中电磁力与弱力相互统一，而且发现这个统一能解决无限的困难，这统一的力被称作弱电力。其理论可被重正化，而且它预言了分别叫做W＋、W-和Z0的3种新粒子。1973年在日内瓦的CERN中发现了Z0的证据。萨拉姆和温伯格因此在1979年获得诺贝尔奖，尽管直到1983年W粒子和Z粒子才被直接观察到。

在称为QCD或者量子色动力学的理论中，强力自身可被重正化。按照QCD，质子、中子以及其他很多物质基本粒子是由夸克构成的。夸克具有物理学家同意称之为颜色的奇妙性质（术语“色动力学”由此而来，尽管夸克的色仅仅为有用的标签——和可见色没什么关联）。夸克以3种所谓的颜色——红、绿和蓝存在。此外，每种夸克都有一个反粒子伙伴，而那些粒子的颜色叫做反红、反绿和反蓝。这里的意思是只有不具有净颜色的组合才能作为自由粒子存在。存在两种得到这种中性夸克组合的方法。一种颜色和其反颜色抵消，因而夸克和反夸克形成一个无色的对，一种称为介子的不稳定粒子。还有，当所有3种颜色（或反颜色）混合，其结果就没有净颜色。3个夸克，每种颜色一个，形成叫做重子的稳定粒子，质子和中子是其中的例子（而3个反夸克形成重子的反粒子）。质子和中子是构成原子核的重子，而且是宇宙中所有正常物质的基础。



重子和介子

人们说重子和介子是由强力将夸克束缚在一起构成的。这样的粒子在碰撞时会交换夸克，然而单独夸克不能被观察到。

QCD还有一个叫做渐近自由的性质，我们在第三章中提到了它但未给它命名。渐近自由是指当夸克靠近在一起时，它们之间的强力很小，但是如果它们离开更远则增大，它们仿佛是用橡皮筋连在一起。渐近自由可以解释为何我们在自然中没有看到孤立的夸克，而且未能在实验室制造它们。尽管我们不能观察到单独夸克，但因为它如此成功地解释质子、中子和其他物质的粒子，所以我们接受这个模型。



“我想，用一个框子把它圈上并不能使之成为统一理论。”

在统一弱力和电磁力后，1970年代，科学家寻找一种将强力加入到这理论中的方法。存在一些将强力和弱力以及电磁力统一的所谓大统一理论或GUT。然而它们中多数预言，质子——我们由之构成的材料，应平均地在10^{32}年后衰变。鉴于宇宙只有10^{10}年那么老，这是非常长的寿

命。但在量子物理中，当我们说一个粒子平均寿命为10^{32}年时，我们不是指大多数粒子都具有近似10^{32}年的寿命：有些长一些，有些短一些。相反地，我们的意思是，每年每个粒子有10^{-32}的衰变可能性。因而你只要盯着容纳10^{32}个质子的大容器几年，你就应能看到一些质子衰变。由于仅1000吨的水就包含10^{32}个质子，所以建造这样的容器不甚困难。科学家进行了这种实验。结果才弄清楚，检测出衰减，并将它跟持续从太空向我们撒来的宇宙线引起的其他事件区分开来绝非易事。为了尽可能地减小干扰，这种实验得在地下深处进行，比如在日本的一座山下深3281英尺的神冈庄矿冶公司的矿井中进行，它可以防御一些宇宙线。研究者从2009年的观测结果得出结论，如果质子真的衰变的话，其寿命要比10^{34}年还长，这对于大统一理论可是个坏消息。

由于更早的观测证据也不能支持GUT，大多数物理学家采纳称作标准模型的特别理论，它包含弱电力的统一理论和作为强力理论的QCD。然而，在标准模型中弱电力和强力分别作用，而未被真正统一。标准模型非常成功并且和所有现在的观测证据相符合，但因为除了没有将弱电力和强力统一外，它还没有纳入引力，所以终究是未惬人意的。

将强力和电磁力以及弱力融合在一起也许已被证明是困难的，但那些问题同将引力与其他3种力合并，或仅创立一个独立的量子引力论相比，可谓小菜一碟。创立量子引力论被证明如此困难的原因必然与我们在第四章中讨论过的海森伯原理有关。尽管并不明显，但从这个原理推论开去，结果表明，场的值与它的变化率起着和粒子位置与其速度同样的作用。也就是说，其中一个越精确地被确定，则另一个只能更不精确地被确定。其重要的一个推论是，不存在像空虚的空间的这类东西。那是因为空虚空间意味着无论是场值还是它的变化率都恰好为零。（如果场的变化率不为零，则空间不会保持空虚。）由于不确定性原理不允许场和变化率都是准确的，所以空间永不能空虚。它可拥有一个最低能量的态，称作真空，然而那个态遭受到所谓的量子颤抖，或者真空涨落——粒子和场不停地出现并消失。

人们可将真空涨落认为是许多粒子对在某一时间一起出现，彼此离开，然而又回到一起，并相互湮没。按照费恩曼图，它们对应于闭合的圈，这些粒子称为虚粒子。和实粒子不同，虚粒子不能用粒子探测器直接观察到。然而，它们的间接效应，诸如在电子轨道上的能量的小改变是可被测量到的，并和理论预言一致到惊人的准确程度。问题是虚粒子

具有能量，而且因为存在无限数目的虚粒子对，它们就会拥有无限的能量。根据广义相对论，这意味着它们会将宇宙弯曲到无限小尺度，这显然没有发生！

这个无限的困难类似于在强力、弱力和电磁力理论中发生的问题，除了在那些场合重正化消除了无限。但在引力的费恩曼图中的闭圈不能被重正化吸收掉，因为在广义相对论中没有足够多的重正化参数（诸如质量和荷的值）去消除从理论来的所有量子无限。因此，我们拥有一个引力理论，它预言某些量，诸如时空曲率是无限的，这个理论无法开动一个可居住的宇宙。那意味着，获得一个切合实际的理论的仅有可能性是，所有的无限以某种方式对消掉，而不用求助于重正化。

1976年，人们对这个问题找到一个可能的解决办法，它称作超引力。加上这个前缀“超”的原因，并不是因为物理学家以为，这个量子引力论是“超级理论”，可能真的行得通。相反地，“超”是指这个理论拥有的称为超对称的一种对称。

在物理学中，如果一个系统的性质经过某种变换比如在空间中旋转或取其镜像的情况下不受影响，则它拥有对称。例如，如果你把一个甜面包圈翻过来，它显得完全相同（除非它上部有巧克力，那就最好吃掉它）。超对称是一种更微妙的对称，与通常空间的变换没有关系。超对称的一个重要含义是力粒子和物质粒子，因此力和物质，事实上只是一个同样东西的两面。实际地讲，那意味着每个物质粒子，例如夸克，应该具有一个力粒子的伙伴粒子，而每个力粒子，例如光子，应该具有一个物质粒子的伙伴粒子。因为，人们发现，从力粒子闭圈引起的无限是正的，而从物质粒子闭圈引起的无限是负的，这样在理论中从力粒子引起的无限和从其伙伴物质粒子引起的无限趋向于抵消掉，所以超对称具有解决无限的问题的可能性。可惜的是，需要通过计算找出在超引力中是否存在任何留下的未被对消的无限；那计算是这么冗长，又是这么困难，并且可能错得离谱，使得没人准备着手进行。尽管如此，大多数物理学家相信，超引力可能是对于把引力和其他力统一的问题的正确答案。

你也许会以为检查超对称的成立是件容易的事——只消检查现存粒子的性质，看它们是否配对。这样的伙伴粒子没有被观察到。然而，物理学家做过的各种计算表明，对应于我们观察到的粒子的伙伴粒子应是质子质量的1000倍那么重，或者更重。这种粒子太重了，以至迄今在任

何实验中都没看到，但在日内瓦的大型强子碰撞机中有望最终创生这样的粒子。

超对称的思想是创造超引力的关键，但此概念实际上是多年前一些研究所谓弦论雏形的理论家们创造的。根据弦论，粒子不是点，而是具有长度却没有高度或宽度的像无限细的一段弦的振动模式。弦论也导致无限，但人们相信，在合适的版本中这种无限将被对消掉。它们还有另外一样不寻常的特征：只有在时空为十维而不是通常的四维时，它们才是协调的。十维也许听起来激动人心，但是你若忘记何处泊车，它们就会引起真正的问题。如果这些额外的维度存在的话，为何我们没有觉察到呢？根据弦论，它们被蜷缩成非常小尺度的空间。为了描述这个，想象一个二维的平面。因为你需要两个数（例如水平坐标和垂直坐标）去定位平面上的任一点，所以称平面是两维的。另一个两维的空间是吸管的表面。为了在这个空间中给一点定位，你要知道这一点位于沿着吸管长度的何处，还需要知道它位于圆周维度的何处。然而如果吸管非常细，那么只用沿着吸管长度的坐标你就能得到近似得非常好的位置，这样你可不考虑圆周的维度。而如果吸管直径是百万亿亿亿分之一英寸，你就根本不会觉察到圆周的维度。这就是弦理论家拥有的额外维的图像——这些额外维是高度弯曲的，或者在小至我们看不见的尺度上卷曲。在弦论中额外维被卷曲成所谓的内空间，相对于我们日常生活中经验到的三维空间。正如我们将要看到的，这些内部状态不只是毫无声息的隐藏的维度——它们具有重要的物理意义。

弦论除了维数的问题，还受另一个令人困惑的问题的折磨：似乎至少存在5种不同的理论以及几百万种额外维蜷缩的方式。对于那些提倡弦论是万物的唯一理论的人而言，这是非常令人困窘的可能性。后来，大约在1994年，人们开始发现二重性——不同的弦论以及不同的蜷缩额外维的方式，是描写四维中的同样现象的全然不同的方式。此外，他们发现超引力也以这种方式和其他理论相关联。弦理论家现在确信，5种弦理论和超引力只是一个更基本理论的不同近似，各自在不同的情形下成立。



吸管和线

吸管是两维的，然而如果其直径足够小——或者从远处来看——它显得像一根线那样是一维的。

正如我们早先提到的，那个更基本的理论称为M理论。似乎无人知道“M”代表什么，它可能代表“主要”、“奇迹”或者“神秘”，它似乎是所有这三者。人们仍然在努力去阐明M理论的性质，但那也许是不可能的。传统上，物理学家期望大自然有一个单一理论，这或许难以获得支持，并且也不存在一单个表述。我们要描述宇宙，可能只好在不同的情形下用不同的理论。每一种理论也许都拥有它自己的关于实在的版本。但是根据依赖模型的实在论，每逢这些理论交叠，也就是它们都能适用之处，只要它们的预言一致，那就可以被接受。

不管M理论是作为一单个表述，还是只作为一个网络而存在，我们的确知道它的一些性质。首先，M理论具有十一维时空，而不是十维时空。弦理论家早就怀疑，十维的预言也许必须调整，而最近的研究显示，有一个维度的确被忽略了。还有，M理论不仅包含有振动的弦，还包含点粒子、二维膜、三维块以及其他更难想象的占据直至九维的更多空间维度的其他物体。这些物体称作p膜（这儿p为从0到9）。

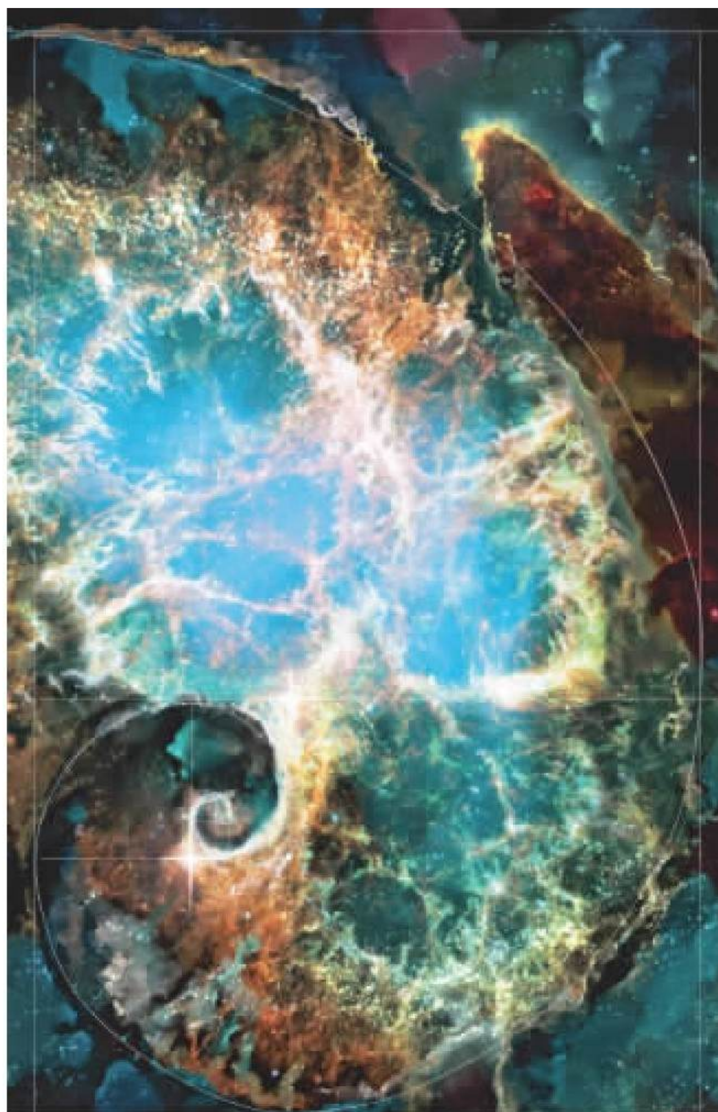
蜷缩成极小维度的大量方式又是怎么回事呢？在M理论中那些额外的空间维度不能以任意方式蜷缩。该理论的数学限制内空间维度能被蜷缩的方式。内空间的准确形状既确定物理常数，比如电子电荷的值，又确定基本粒子之间相互作用的性质。换言之，它确定自然的表观定律。我们说“表观”是因为我们说的定律是指在我们的宇宙中观测到的——4种力的定律，以及诸如那些表征基本粒子的质量和荷之类的参数。但是更基本的定律是M理论中的那些定律。

因此，M理论的定律允许拥有不同表观定律的不同宇宙，表观定律

依内空间如何蜷缩而定。M理论具有允许许多，也许多达10^{500}的不同内空间的解，这意味它允许10^{500}个不同宇宙，各自具有自己的定律。为了体会这个数字有多大，这么想想吧：如果某种生物只用1毫秒就能分析为其中一个宇宙作预言的定律，并且从大爆炸起就开始进行，至今那个生物才研究了其中的10^{20}个，而且那是连在喝咖啡的时间都不休息的情形下进行的。

牛顿在几个世纪之前证明，数学方程能对物体相互作用的方式给出令人惊讶的准确描述，无论是在地球还是在天穹。科学家们由此相信，只要我们知道正确的理论并拥有足够的计算能力，便能预见整个宇宙的未来。后来出现了量子不确定性、弯曲空间、夸克、弦以及额外维，而他们工作的最后结果是10^{500}个宇宙，各自拥有不同的定律，其中只有一个对应于我们所知的宇宙。物理学家原先希望创造一个单一的理论，把我们宇宙的表观定律解释成一些由寥寥几个简单假设所能推出的唯一结果，这种希望也许必须被抛弃。那我们该怎么办？如果M理论允许10^{500}族表观定律，那我们为何落到这个宇宙，并拥有我们的表观定律？其他那些可能的世界又该如何呢？

第六章　选择宇宙



根据中非波桑歌人的传说，太初只有黑暗、水和伟大的天神奔巴。一天，奔巴胃病发作，呕吐出太阳。一会儿，太阳灼干了一部分水，留下大地。可是奔巴仍然胃痛不止，又吐出来月亮和星辰，然后吐出一些动物：豹、鳄鱼、乌龟……最后是人。墨西哥和中美洲的玛雅人描述在创生之前的类似时期。那时存在的一切是海洋、天空和造物主。在玛雅

传说中，造物主创造了土地、山岳、树林和大多数动物，但他不快活，因为没有赞美者。由于动物不能说话，他决定创造人类。他先用泥土做人，但他们只能胡说。他将他们溶掉，再试，这回用木头塑造出人来。但那些人很笨，他决定将其毁灭，但他们逃进树林，逃窜途中受到一些伤害后发生了些许的改变，创生了当今知道的猴子。那次惨败之后，最终造物主找到了一个方案，用白色玉米和黄色玉米造出人类。我们今天用玉米制造酒精，然而迄今还未达到造物主制造喝它的人的本领。

诸如此类的古代创生神话都试图回答我们在本书里想要解决的问题：为何存在一个宇宙？为何宇宙如此这般？自古希腊开始的多少世纪里，我们回答这类问题的能力逐渐增强，而在20世纪，这种能力极度发展。有前面的章节作背景准备，现在我们要对这些问题提供可能的答案。

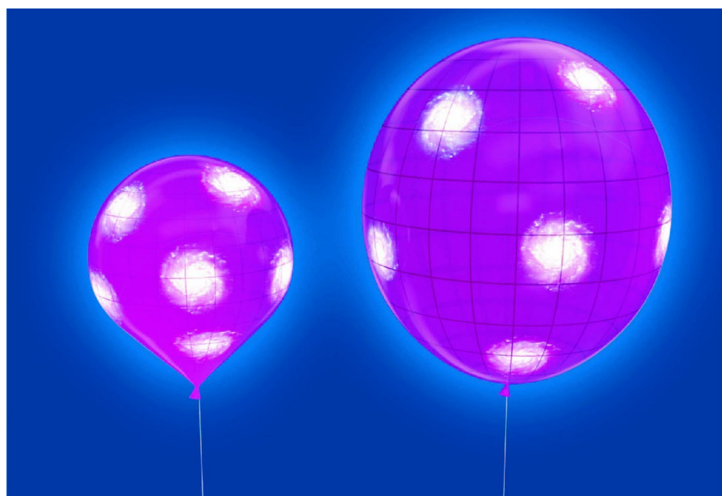
有件事可说是自古以来就很明显的：要么宇宙是一个非常晚近的创生物，要么人类只在宇宙历史中存在了一小部分的时间。那是因为人们在知识和技术上如此迅速地改善，如果人类在周围存在了几百万年，那么人类要先进得多。

根据旧约，上帝在创生之后仅6天就创生了亚当和夏娃。1625～1656年间的全爱尔兰大主教厄谢尔主教甚至把世界起源更精确地设定于公元前4004年10月27日的早上9点。而我们采取不同观点：人类是近代创生的，然而宇宙本身的起始要早得多，大约在137亿年前。

宇宙具有开端的第一个真正的科学证据是1920年代出现的。正如我们在第三章中说过的，那时大多数科学家信仰一直那样存在的静态宇宙。与此矛盾的证据是间接的，那是基于埃德温·哈勃在加利福尼亚帕萨迪纳的威尔逊山利用100英寸望远镜进行的观测。哈勃分析了邻近的所有星系发射的光谱之后，确定几乎所有的星系都远离我们而去，而且它们离得越远，就运动得越快。1929年，他发表了一个将退行速度和它们离开我们距离相关的定律，并得出结论说宇宙正在膨胀。如果这是真的，那么宇宙在过去就应该较小。事实上，如果我们回溯到遥远的过去，宇宙中所有的物质和能量就应集中在具有不能想象的密度和温度的非常微小的区域，而且如果回溯到足够早，那么就存在一个一切起始的瞬间——我们现在称这个事件为大爆炸。

宇宙正在膨胀的观念有些微妙。例如，我们不是说宇宙以这种方式

膨胀，比如，人们可以把墙打掉，在曾经长着大橡树的位置装修一个洗澡间。说得更准确些，是宇宙中的任何两点之间的距离在变大，而非空间在延续其自身。1930年代，这种观念在大量的争议中脱颖而出。而想象它的最好方法之一仍然是剑桥大学天文学家阿瑟·爱丁顿在1931年清楚地阐述的比喻。爱丁顿把宇宙想象成一个膨胀的气球的表面，而所有星系为那个表面上的点。这个图像清晰地阐释了为何远处的星系比近处的退行得较快。例如，如果气球的半径每小时加倍，那么在这气球上的任何两个星系之间的距离每小时会加倍。如果两个星系在某一时刻相距1英寸，1小时后它们就会相距2英寸，而它们显得以每小时1英寸的速率相互运动离开。但是如果它们开始是离开2英寸，1小时后它们就分开4英寸，而显得是以每小时2英寸的速度相互运动离开。这正是哈勃的发现：星系越远，它离开我们运动得越快。



气球宇宙

远处星系离开我们后退，正如宇宙整体是在一个巨大的气球表面上。

空间的膨胀不影响诸如星系、恒星、苹果、原子或其他由于某种力束缚在一起的物体的尺度，意识到这一点很重要。例如，如果我们在气球上圈出一个星系团，在气球膨胀时，那个圆圈并不膨胀。毋宁说，因为星系受引力的束缚，当气球膨胀时圆圈和在其中的星系会保持尺度和外形。因为只有当我们测量的工具具有固定尺寸时，我们才能检查膨胀，所以这一点是重要的。如果万物都自由膨胀，那么我们，我们的标准，我们的实验室等就都会按比例膨胀，而我们就不会觉察到有任何不同了。

对于爱因斯坦，宇宙正在膨胀是一条新闻。然而基于爱因斯坦自己的方程产生的理论根据，早在哈勃论文问世几年之前，就已经有人提出了星系彼此离开运动的可能性。1922年，俄国物理学家兼数学家亚历山大·弗里德曼研究了基于两个可使数学极度简化的假定之上的一个宇宙模型：宇宙在任何方向都显得相同，以及从所有观察点看也是这样。我们知道弗里德曼第一假定不完全真实——还好宇宙并非处处一致！如果我们往上凝视一个方向，我们也许看到太阳；在另一方向是月亮，或者是一群迁徙的吸血鬼蝙蝠。然而，在甚至比星系距离大得多的尺度下看，宇宙在每一方向的确显得大致相同。这很像往下俯瞰森林。如果你处于足够近处，你能辨别出单片叶子，或至少树以及之间的空间。然而，如果你处于相当高的地方，把你拇指伸出就遮盖3平方英里的树，森林就显得是一片均匀的绿荫。我们会说，森林在那个尺度上是一致的。

基于自己的假定，弗里德曼能够发现爱因斯坦的一个解，在该解中，宇宙膨胀。以后不久，哈勃发现这种膨胀方式是千真万确的。特别是，弗里德曼的宇宙模型从零尺度起始，而且膨胀直至引力吸引使之缓慢，并最终使之向自身坍缩。（结果，爱因斯坦方程还有两种其他类型的解也满足弗里德曼模型的假设，其中一种对应于永远继续膨胀的宇宙，尽管它会缓慢下来一些，而另一种其膨胀率向零减缓，但永远不会到达零。）弗里德曼完成这个研究之后没几年即去世，直至哈勃发现之后，大家才知道弗里德曼的思想。然而，一位名为乔治·勒梅特的物理学教授和罗马天主教牧师在1927年提出类似的思想：如果你沿着宇宙历史回溯到过去，它会变得越来越小直到一个创生时刻——那就是今天我们称作大爆炸的时刻。

并非人人都喜欢大爆炸的图像。事实上，“大爆炸”这个术语是1949年剑桥天体物理学家弗雷德·霍伊尔创造的。他深信宇宙永远膨胀，就用这个术语戏称之。直至1965年支持这个观点的最早直接观测才出现，人们发现在整个太空存在着暗淡的微波背景。这个宇宙微波背景辐射或CMBR，和你的微波炉中的一样，只不过微弱得多。你把电视转到一个不用的频道就能看到CMBR——你在屏幕上看到的雪花，百分之几是由它引起的。这个辐射是两位贝尔实验室的科学家在努力消除从他们微波天线来的这种干扰时偶然发现的。他们起初以为这种干扰也许是由栖息在天线中的鸽子粪引起的，然而结果是他们的问题拥有更有趣的起源——CMBR是从大爆炸后很短的时间存在过的非常热非常致密的早期宇宙遗留下来的辐射。随着宇宙膨胀，它冷却下来，直至辐射变成仅仅是

我们现在观察到的暗淡的残余。现在这些微波只能将你的食物加热到大约-270摄氏度——绝对温标3开，对于爆玉米花没多大用处。

天文学家还发现了支持一个炽热而微小的早期宇宙的大爆炸图像的其他特征标志。例如，在第1分钟左右，宇宙会比典型恒星的中心还热。在那个时期，整个宇宙就像一个核聚变反应堆那样行为。当宇宙足够膨胀并冷却，该反应就停止了。然而理论预言，这会遗留一个由氢为主要成分的宇宙，但还有大约23%的氦，以及微量的锂（所有更重的元素都是后来在恒星中形成的）。计算结果和我们观察到氦、氢和锂的含量非常一致。

氦丰度以及CMBR的测量为极早期宇宙的大爆炸图像提供了令人信服的有利证据，然而尽管人们可将大爆炸图像认为是早期的一个成功的描述，严格地接受大爆炸，也就是说，认为爱因斯坦理论提供了宇宙起源的真正图像却是错误的。那是因为广义相对论预言在时间中存在一点，那时宇宙温度、密度和曲率都是无限的，这是数学家称之为奇点的情形。对于物理学家而言，这表明在那一点上爱因斯坦理论崩溃了，因此不能用以预言宇宙为何起始，只能用以预言之后它如何演化。因而尽管我们可以使用广义相对论的方程和我们对天空的观测去认识极年轻时代的宇宙，但将大爆炸图像一直延伸至起始却是不正确的。

我们将会很快回到宇宙创生问题，但首先要讲一下有关膨胀的第一相，物理学家称之为暴胀。如果你没在津巴布韦住过——那里通货膨胀最近超过200万倍——这个术语也许听起来并不那么有爆炸性。然而，甚至根据保守的估计，在这个宇宙暴胀期间，宇宙在0.000.000.00000000000000000000000000001秒膨胀了1000000000000000000000000000000倍。它仿佛是直径1厘米的硬币忽然爆炸到银河系宽度的一千万倍。这似乎违反了相对论，它要求没有任何东西可比光运动得更快，但那个速度极限不能适用于空间本身的膨胀。

这种暴胀的事件也许发生过的思想首先是在1980年代提出的，那是基于超出爱因斯坦广义相对论，并注意到量子论方面的考虑。由于量子引力论尚不完备，其细节还在研究之中，因此物理学家尚未确切地肯定暴胀如何发生。然而根据理论，由暴胀引起的膨胀不会是完全均匀的，不像传统的大爆炸图像预言的那样。这些无规性在不同方向的CMBR的温度上会产生微小的变化。这种变化太小了，以至于在1960年代还未被

观测到，然而1992年首次被NASA的COBE卫星、后来又被它的后继者——2001年发射的WMAP卫星测量到。因而，我们现在确信暴胀的确发生过。

具有讽刺意味的是，尽管CMBR中的微小变化作为暴胀的证据，CMBR的温度几乎完美的均匀性却是暴胀之为重要概念的一个原因。如果你使物体的一部分比它的周围更热，然后等待，这热点会冷却下来，而周围变得较暖，直到与物体的温度相一致。类似地，人们可以预料宇宙的温度最终会达到一致。但是这个过程花费时间，而如果暴胀没有发生过，假定这种热传输的速度受光速的限制，则在宇宙的历史中就不会有足够的时间让热在相隔很远的区域变得均匀。一个非常快速（比光速快得多）的膨胀时期可以纠正这个问题，因为在极短暂的前暴胀早期宇宙中就可有足够的时间使均匀化发生。

暴胀至少在一个意义上解释了大爆炸中的爆炸，这就是，暴胀所代表的膨胀比广义相对论所预言的传统大爆炸在暴胀发生的时间段里的膨胀远为极端。问题在于，为了我们的暴胀理论模型能有效运行，必须以一种非常特殊和高度不可思议的方式设定宇宙的初始态。这样，传统的暴胀理论解决了一族问题，却产生了另一个问题——需要一个非常特别的初始态，我们即将描述的宇宙创生理论将消除这个零时间的问题。

由于我们不能利用爱因斯坦的广义相对论来描述创生，如果我们要描述宇宙的起源，广义相对论就必须被一个更完备的理论取代。人们期望，即便广义相对论不崩溃，也需要更完备的理论，因为广义相对论没有考虑由量子论制约的小尺度物质结构。我们在第四章中提到，因为量子论适用于描述微观尺度的自然，在宇宙大尺度结构的研究中，对于多数实际的目的，量子论不大相干。然而，如果你在时间中回溯至足够远，宇宙就和普朗克尺度一样小，即十亿亿亿亿分之一厘米，这是必须考虑量子论的尺度。这样，虽然我们还未拥有一个完备的量子引力论，但我们的确知道，宇宙的起源是一个量子事件。因而，正如我们——至少临时地——把量子论和广义相对论相结合以导出暴胀理论，如果我们要回溯得更远并理解宇宙的起源，就必须将我们关于广义相对论的知识与量子论相结合。

为了要知道这如何进行，我们需要理解引力弯曲空间和时间这一原理。空间弯曲比时间弯曲较易想象，把宇宙想象为一张台球台的平坦表面。这台面是个平坦空间，至少在两维上是这样。如果你在台上滚球，

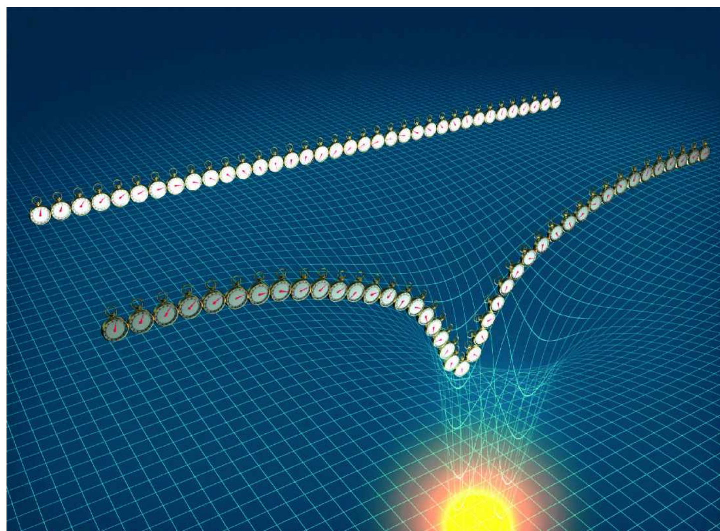
它就沿直线运动。倘若台面有些地方被弯曲或者被弄成凹痕，如下图所示，那么球就会走弯路。



空间弯曲

物质和能量弯曲空间，改变物体的路径。

因为在这个例子中台球台被弯曲到以外我们能看见的第三维中，所以很容易看出它是如何被弯曲的。由于我们不能离开我们自己的时空去观看它的弯曲，故较难想象我们宇宙中的时空弯曲。然而，即便我们不能离开并从更大空间的透视来看它，也仍然能够检测到曲率。从空间本身之中即能检测到它。想象一只小蚂蚁被限制在台面上。即便蚂蚁不能离开台面，只要仔细地把距离记录下来，它就能检测到弯曲。例如，在平坦的空间中，圆周长总是比从中穿越的直径距离的3倍多一些（其真正的倍数为π）。然而，如果蚂蚁取捷径穿过环绕左图台面中的井的圆周，它将发现越过的距离比预想的大一些，大于围绕它的距离的1/3。事实上，如果这口井足够深，蚂蚁会发现，绕过它比穿越它还近些。对于我们宇宙中的弯曲这也同样成立——它以一种可从宇宙内测量的方式，拉伸或压缩空间点之间的距离，改变其几何或者形状。时间的弯曲以类似的方式拉伸或压缩时间间隔。



时空弯曲

物质和能量弯曲时间，而且使时间维度和空间维度“混合”。

掌握好这些观念之后，让我们再回到宇宙起始的问题。在牵涉低速和弱引力的情形下，像在这里的讨论中一样，我们不妨分别谈论空间和时间。然而，一般而言时间和空间能变成互相纠缠，因此它们的伸缩也牵涉一定程度的混合。这个混合在早期宇宙中是重要的，并且是理解时间开端的关键。

时间开端的问题有点类似世界边缘的问题。在人们认为世界是平坦时，也许会纳闷儿海水是否会从边缘泻出来。这已经被实验检测过：人们可以围绕着世界旅行，而并未掉下来。当人们意识到世界不是一块平板，而是一个曲面时，在世界边缘会发生何事的问题也就解决了。然而，时间似乎像一个模型铁轨。如果它具有开端，那就应该存在某者（即上帝）将火车开动。尽管爱因斯坦的广义相对论把时间和空间统一成时空，并涉及空间和时间的某种混合，时间仍然有异于空间，而且要么具有开端和终结，要么无限地延伸。然而，一旦我们将量子论效应加到相对论之上，在极端的情形下发生的弯曲可达到如此巨大的程度，以至于时间就像空间的又一维那样行为。

在早期宇宙——当宇宙小到足够让广义相对论和量子论一起制约之时——有效地存在四维空间而不存在时间。这意味着，当我们提及宇宙的“起始”，我们正位于微妙问题之边缘，即当我们向极早期宇宙回溯时，我们所知的时间并不存在！我们必须接受，我们通常的空间和时间

观念不适用于极早期宇宙。这超出我们的经验，却未超出我们的想象或数学。如果在早期宇宙中所有四维都如空间那样行为，对于时间的起始会发生什么呢？

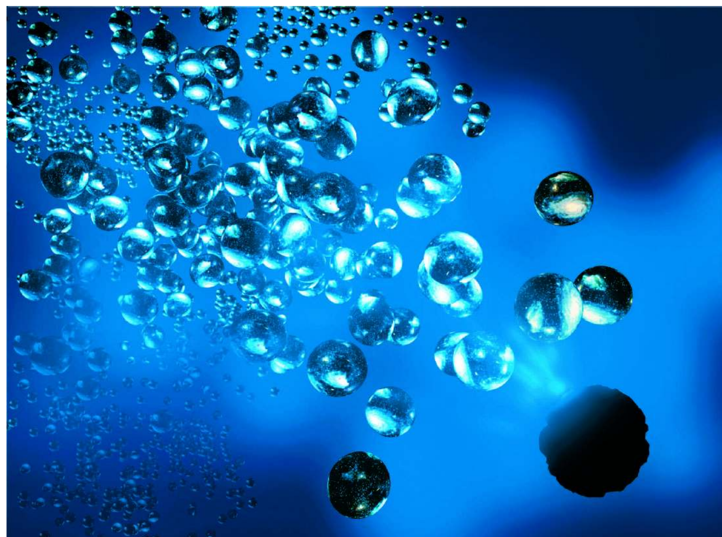
意识到时间可像空间的又一方向那样行为意味着，以类似我们摆脱世界边缘的方式，人们也可以摆脱时间有个起始的问题。假设宇宙的起始像地球的南极，纬度取时间的角色。随着人们往北运动，代表宇宙尺度的等纬圈将膨胀。宇宙在南极作为一点起始，但是南极和任何其他点都非常像。询问在宇宙起始之前发生什么成为无意义的问题，因为在南极之南不存在任何东西。在这个图像中，时空没有边界——同样的自然定律在南极如在他处一样成立。类似地，当人们将广义相对论和量子论相结合时，关于在宇宙开端之前发生什么的问题就变得无意义了。历史必须是无边界的闭合面的思想被称为无边界条件。

多少世纪来，包括亚里士多德在内的许多人，都相信宇宙必定一直存在，以此避免它如何开始的问题。其他人相信宇宙有一开端，并以此作为上帝存在的一个论证。意识到时间像空间那样行为呈现了一个新的选择。它不仅排除了对宇宙具有开端的长期的异议，而且意味着宇宙的起始由科学定律来制约，而不必由某位神来启动。

如果宇宙的起源是一个量子事件，那么费恩曼的历史求和就应能准确地描述它。然而，将量子论应用到整个宇宙——在这里观察者是被观察的系统的一部分——是难处理的。在第四章中我们看到，射到一个具有两道缝隙的屏幕的物质粒子如何像水波那样显示干涉条纹。费恩曼指出，这是由于粒子不具有唯一的历史引起的。也就是说，当它从始点A运动到某个终点B时，它不采取一个确定的路径，而是同时采取连接这两点的所有可能的路径。从这个观点看，干涉并不奇怪，因为，例如粒子或可同时穿过两道缝隙而和它本身干涉。将费恩曼的方法应用于粒子运动，该方法告诉我们，为了计算任何特别终点的概率，我们必须考虑粒子从它起点到那个终点可能遵循的所有可能历史。人们也能用费恩曼方法来计算观测宇宙的量子概率。如果它们被应用于宇宙整体，不存在点A，这样我们就将所有满足无边界条件和结束于我们今天观测的宇宙的所有历史叠加起来。

这个观点认为，宇宙自发出现，以所有可能的方式开始。其中的大多数对应于其他宇宙。那些宇宙中，有一些类似于我们的，大多数则非常不同。它们不仅是细节不同，诸如猫王是否英年早逝或者芜菁是否为

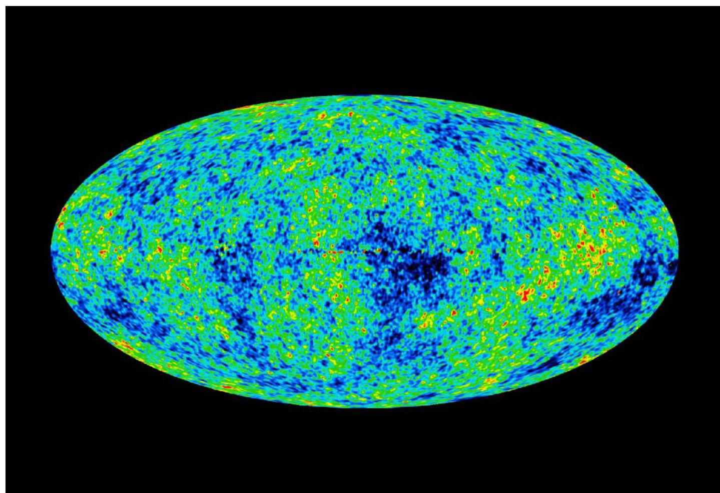
一种餐后的甜点，相反，它们甚至在自然的表观定律上迥然不同。事实上，存在拥有许多不同族物理定律的宇宙。许多人将这个观念故弄玄虚，有时称作多宇宙概念，但这种种说法，只不过是费恩曼历史求和的不同表达。



多宇宙

量子涨落导致微小宇宙从无中创生出来。其中的一些达到临界尺度，然后以暴胀的方式膨胀，形成星系、恒星以及至少在一种情形下形成像我们这样的生命。

为了摹想这个，让我们改动一下爱丁顿的气球比喻，而把膨胀的宇宙认为是泡的表面。那么，我们的宇宙自发量子创生的图像，有点像在沸水中蒸汽泡的形成。许多微小气泡生生灭灭。这些代表着膨胀但在其仍然处于微观尺度时坍缩的微宇宙。它们代表着可能的另外的宇宙，但由于它们未能维持足够久使得星系和恒星，更不用说智慧生命得以发展，所以不太有趣。然而其中一些小泡泡会长得足够大，使得它们避免坍缩。它们将以不断增加的速度继续膨胀，而形成我们能看到的蒸汽泡。这些对应于开始以不断增加的速度膨胀的宇宙——换言之，即是处于暴胀状态的宇宙。



微波背景

这张天图是由2010年准许发表的WMAP7年的资料制作的。它揭示了回溯到137亿年前的温度涨落——用不同颜色显示。画出的涨落对应于比千分之一摄氏度还要小的温度差别。然而，它们是长大形成星系的籽。此图承NASA/WMAP科学团队提供。

正如我们说过的，由暴胀引起的膨胀不会完全均匀。在历史求和中，只存在一个完全均匀和规则的历史，而它具有最大的概率，但是其他许多稍微不规则的历史将具有几乎同样大的概率。这便是为何暴胀预言，早期宇宙可能稍许不均匀，这对应于在CMBR中被观测到的微小温度变化。早期宇宙的无规性是我们的福气。此话怎讲？如果你不想从牛奶分离出乳酪，均匀性自然是好的，但一个均匀宇宙令人厌烦。因为在早期宇宙中，如果某些区域具有比它处稍高的密度，那和它周围相比，额外密度的引力吸引会减缓那个区域的膨胀，所以无规性很重要。随着引力缓慢地将物质拉近，它最终能使它坍缩形成星系和恒星，后者能导致行星，而且至少在一种场合导致人的产生。所以，要仔细看这张天空微波图，它可是宇宙中一切结构的蓝图。我们则是极早期宇宙量子涨落的产物。于是，信教的人可以说，上帝的确掷骰子。

这个观念导致一种和传统概念根本不同的宇宙观，要求我们调整思索宇宙历史的方式。为了在宇宙学中作预言，我们需要计算在此刻整个宇宙的不同状态的概率。在物理学中，人们通常对一个系统假定某一初始态，利用有关的数学方程向时间的前方演化。给定一个时刻一个系统的态。人们试图计算在以后一个时刻该系统处于某一不同的态的概率。宇宙学中通常假定宇宙有一单个确定的历史。人们可以利用物理学定律去计算这个历史如何随时间发展。我们将此称作宇宙学的“从底往上”方

法。然而，由于我们必须考虑如费恩曼历史求和所表述的宇宙量子性质，宇宙现在处于一个特别的态的概率幅度，乃是由把所有满足无边界条件而结束于该状态的历史所作的贡献叠加在一起而得出。换言之，在宇宙学中人们不应该从底往上遵循宇宙的历史，因为那假定了存在一单个历史，具有明确定义的起点和演化。相反地，人们要从顶往下地跟随历史，从现时刻往回溯。某些历史比其他的历史可能性更大，而求和通常被一单个历史所支配，这个历史开始于宇宙的创生而完成于正被考虑的态。然而，对于宇宙在此刻当下不同的可能的态，乃存在不同的历史。这就导致宇宙以及因果之间关系的根本不同的观点。对费恩曼求和有贡献的历史并没有独立的存在，而依赖于什么正在被测量。我们用自己的观测来创造历史，而非历史创生我们。

宇宙不具有一个唯一的独立于观察者的历史这一思想，似乎和我们知道的某些事实相矛盾。也许存在一个历史，其中的月亮是羊乳酪做的。但是我们观察到的月亮不是乳酪做的，这对于耗子是个坏消息。因此，有些历史，比如说，其中的月亮是乳酪做的那号历史，对我们宇宙的现态没有贡献，尽管那样的历史也许对其他宇宙有贡献。这听起来像是科幻小说，但它不是。

从顶往下方法的一个重要含义是，自然表观定律依赖于宇宙历史。许多科学家相信存在单个理论，能解释那些定律和自然的物理常数，诸如电子质量或者时空的维数。但是从顶往下宇宙学要求，自然表观定律因不同历史而不同。

想一想宇宙的表观维度。根据M理论，时空具有十个空间维度和一个时间维度。意思是空间的七个维度蜷缩到我们觉察不到的那么小，给我们留下错觉以为所有存在的只是余下的三个我们熟悉的大的维度。M理论未能解决的核心问题之一是：在我们宇宙中为何不能有多于三个大的维度，以及为何不能有任何数目的维度蜷缩起来？

许多人愿意相信，存在某种机制使空间维度除了三个以外都自发蜷缩。另外有可能是，或许所有的维度都从微小起始，但是因某种可理解的原因，三个空间维度膨胀了，而其余的没有膨胀。然而，似乎没有动力学原因让宇宙显得是四维的。相反地，从顶往下的宇宙学预言，大的空间维度的数目并非由任何物理原理所确定。对于从零到十的大空间维度的数目，都有一个量子概率幅度。对于宇宙的每一种可能历史，费恩曼求和允许所有这一切；然而，观察到我们宇宙具有三个大的空间维

度，就选取出一些历史的亚类，它们具有正被观测的性质。换言之，宇宙具有多于或少于三个大空间维度的量子概率是没有关系的，因为已经确定我们是处于一个具有三维大空间维度的宇宙中。这样，只要对于三个大空间维度的概率幅度不是确切为零，它与其他数目维度的概率幅度相比较，不管多么小都没关系。这就像问现任教皇是中国人的概率幅度。我们知道他是位德国人，即使他是中国人的概率更高，因为中国人比德国人多。类似地，我们知道我们的宇宙展现三个大的空间维度，因此，即使其他数目的大空间维度也许具有更大的概率幅度，我们也只对具有三维的历史感兴趣。

蜷缩的维度又是怎么回事呢？回忆一下，在M理论中，余下的蜷缩维度，内空间的精确形状既确定诸如电子电荷的物理量的值，又确定基本粒子之间的相互作用，也就是自然力的性质。如果M理论只允许蜷缩的维度取一种形状，或者允许一些，但是其中除了一种都被某种手段排除掉，只给我们留下自然的表观定律的一种可能性，那么事情的结果就很漂亮。然而不然。也许多达10500种不同的内空间都拥有一些概率幅度，每种内空间都导出不同的定律和不同的物理常数值。

如果人们从底往上建立宇宙的历史，就没有理由让宇宙应终止于对应于我们实际观测到的粒子相互作用，即（基本粒子相互作用）标准模型的内空间。但在从顶往下方法中，我们接受具有所有可能内空间的宇宙存在。在一些宇宙中，电子具有高尔夫球的质量，且引力比磁力更强。标准模型及其所有参数适用于我们的宇宙。人们可以计算在无边界条件下导致标准模型的内空间的概率幅度。如同存在具有三个大空间维度的宇宙的概率一样，这个概率相对于其他可能性的幅度是多小都没有关系，因为我们已经观察到标准模型描述我们的宇宙。

我们在这一章中描述的理论是可检验的。在较早的例子中，我们强调了，对于极端不同的宇宙，诸如那些具有不同数目的大空间维度的宇宙，其相对概率幅度并不重要。重要的是相邻（即相似）宇宙的相对概率幅度。无边界条件意味着，完全光滑地启始宇宙的历史拥有最高的概率幅度。对于更无规的宇宙其幅度被减小。这表明早期宇宙曾经是几乎光滑的，但具有小无规性。正如我们提到过的，我们能在从天空的不同方向来的微波的微小变化中观测到这些无规性。人们已经发现它们和暴胀理论一般要求完全相符；然而，需要更精密的测量才能把从顶往下理论和其他理论辨别开来，并且要么支持，要么拒绝。这些很可能在将来

用卫星来实施。

几百年前，人们认为地球是唯一的，并位于宇宙中心。今天我们知道，在我们星系中存在几千亿颗恒星，其中很大的百分比拥有行星系统，以及存在几千亿个星系。本章描述的结果指出，我们的宇宙本身也是许多宇宙中的一个，而且其表观定律不是唯一确定的。那些希望终极理论即万物理论能预言日常物理性质的人，对此一定非常扫兴。我们不能预言诸如大空间的维数，或者预言确定我们所观察的物理量（例如，电子和其他基本粒子的质量和荷）的内空间。毋宁说，我们使用那些数目去选择哪种历史对费恩曼求和有所贡献。

我们似乎正处于科学史的临界点，此刻必须变更我们有关目标以及使物理理论可被接受的条件的观念。看来，自然表观定律共有多少，乃至取何形式，都不是逻辑或物理原则所必然要求的。参数可自由采取许多值，而定律也可采取任何导致一个自洽的数学理论的形式，而且在不同的宇宙中，它们的确采取不同的值和不同的形式。那可能不满足我们人类的欲求——希望我们自己是特殊的，或者想发现容纳所有物理定律的优雅集合。但那也许正是自然的方式。

似乎存在可能宇宙的巨大全景。然而，正如我们将在下一章中看到的，像我们这样的生命在其中能存在的宇宙是很稀罕的。我们生活在其中生命是可能的一个宇宙中，然而假若宇宙稍为不同，像我们这样的生命便不存在。从这种微调我们可得出什么结论呢？这证明宇宙归根到底是由一位仁慈的造物者设计的吗？或者，科学会提供另外的解释？

第七章　表观奇迹

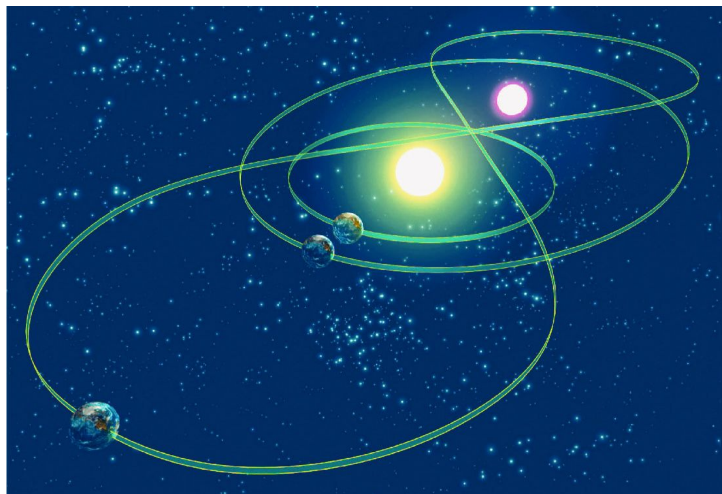


据中国人讲，我们的宇宙环境在夏朝（约前2205～约前1782年）忽然改变。天空出现了10个太阳。其灼热使地球上的人们痛苦不堪，于是皇帝命令著名弓箭手后羿射落额外的太阳。后羿得到一个长生不老的药丸作为奖赏，但他的妻子嫦娥偷走药丸。由于这个罪过她被驱逐到月

亮上去。

中国人认为拥有10个太阳的太阳系对人类生活不友善，这点是正确的。我们今天知道，除了让皮肤晒黑这点好处之外，具有多个太阳的太阳系也许永不允许生命发展。其原因不像中国神话想象的灼热那么简单。事实上，一个围绕多个恒星公转的行星至少有一阵能感受到舒适的温度。但对于生命似乎必要的长期一致的供热，则不太可能。为了理解其原因，让我们看看最简单的多恒星系统，一种具有两个太阳的称作双星系统。天空中大约有一半的恒星是这种系统的成员。然而甚至简单的双星系统也只能维持显示在下图的那种类型的某种稳定轨道，这些轨道中的每一个都可能有这样的时候，这时行星要么太热要么太冷，以至于不能维系生命。多恒星团的情形甚至更坏。

我们太阳系还具有其他“幸运”的性质，若无这些性质，也许永远不能进化出复杂的生命形式。例如，牛顿定律允许行星轨道要么是圆要么是椭圆（椭圆是挤扁的圆，沿着一个轴上较宽，而沿着另一轴较窄）。椭圆被挤扁的程度用所谓的偏心率来描述，这是一个在0和1之间的数。偏心率接近0表示图形类似于圆周，而偏心率接近1表示它非常扁。恒星不进行完美的圆周运动使开普勒非常不安，然而地球轨道的偏心率大约仅为2%，这表明它几乎是圆形的。后来发现，这真是个好运气。

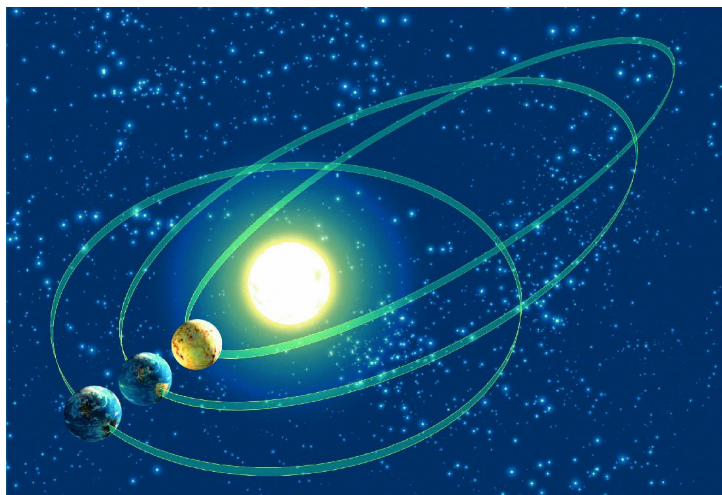


双星轨道

围绕双星系统公转的行星可能拥有荒凉的天气，对于生命而言，有些季节过热，其他季节又过冷。

地球上的季节天气模式主要是由地球旋转轴相对于围绕太阳轨道面

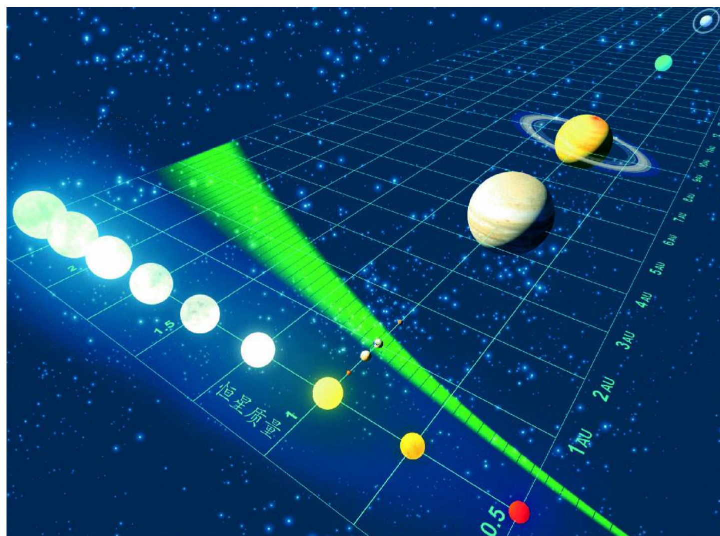
的倾角确定。例如，在北半球冬季之际，北极向离开太阳方向倾斜。事实上在那时，地球离太阳最近——只有0.915亿英里那么远，而相对于7月初离开太阳大约有0.945亿英里，这个事实和它的倾斜相比，对于温度只有可忽略的效应。然而，在具有大轨道偏心率的行星上，离日距离的变化起的作用就大多了。例如，在具有偏心率20%的水星上，处于近日点时它的温度超过其处于远日点时200°F。事实上，如果地球轨道的偏心率接近于1，我们到达近日点时海洋会沸腾，而到达远日点时海洋会冰冻，无论是寒假还是暑假都不宜人。大轨道偏心率无助于生命，因此我们很幸运地拥有其轨道偏心率接近于0的一个行星。



偏心率

偏心率是一个椭圆偏离一个圆有多近的量度。圆周轨道对生命友好，而延伸得非常长的轨道导致巨大的季节温度波动。

在太阳质量和我们离开它的距离的关系上，我们也很幸运。这是因为恒星质量确定其放出的能量数量。最大的恒星拥有的质量大约为我们太阳的100倍，而最小的恒星大约为我们太阳的1%。而且还有，假如日地距离给定，如果我们的太阳只要轻或重20%，地球就会比现在的火星更凉，或比现在的金星更热。



金凤花带

如果金凤花对行星取样检查，她只会在绿带中找到那些适合生命的。黄色的恒星代表我们的太阳。较白的恒星较大较热，较红的较小较冷。行星比绿带靠它们的太阳更近，对生命而言则太热，而更远的行星就太冷。对于较冷恒星可居住带较小。

传统上，给定任何恒星，科学家将可栖息区域定义为围绕着恒星的狭窄地区，该处温度使得液态水能存在。可栖息区域有时称为“金凤花区域”，这是因为要求液态水存在意味着，正如金凤花，智慧生命的发展要求行星温度“刚好合适”。上面的画里我们太阳系中的可栖息区域很微小。幸运的是，对于我们之中的那些智慧生命形式，地球刚好落在其中！

牛顿相信，我们奇异的可栖息区域并非“仅由自然定律从混沌中产生”。相反，他主张，宇宙中的秩序“最初是由上帝创造的，并由他将同样的状态和条件保存至今”。很容易理解为何人们会这么想。如果我们的太阳系是宇宙中唯一的，那么许多似不可信的事件协同发生使我们得以存在，以及我们世界的善待人类的设计，确实令人困惑。然而，1992年首次确认，观测到另有一个像我们这样的太阳，有一颗像地球这样的行星绕之公转。我们现在知道几百颗这样的行星，而很少有人怀疑，在我们宇宙中的亿万颗恒星之中存在无数其他的行星。这使得我们的行星条件——单一太阳，日地距离和太阳质量——的巧合作为地球是仅仅为了讨好我们人类而精心设计的证据，远非那么不寻常，那么引人注目。存在各种各样的行星。有些——至少一个——支持生命。显然，当一个支持生命的行星上的生命研究围绕着他们的世界，他们一定发现其环境满

足他们要求的存在条件。

上面的陈述可以表达为一个科学原理：正是我们的存在赋予了确定我们从何处在何时可能观测宇宙的规则。也就是说，我们存在的事实限制了我们发现自己处于其中的一类环境的特征。这个原则称为弱人择原理。（我们很快就要看到为什么附加了形容词“弱”。）比人择原理更好的术语可以是“选择原理”，因为这原理是指对我们存在的自我了解如何强加规则，这规则从所有可能的环境中只挑出那些具有允许生命发生的特征的环境。

虽然也许听起来像哲学，弱人择原理可用来进行科学预言。例如，宇宙有多老了？正如我们很快就要看到的，为了我们的存在宇宙必须包含诸如碳的元素，碳是在恒星之中由加热更轻的元素产生的。然后碳必须在一次超新星爆发中通过太空散射，而最终在新一代的太阳系中凝聚成行星的部分。1961年，物理学家罗伯特·迪克论证道，这个过程大约要花100亿年，这样，我们在此存在，就意味着宇宙应至少那么老。另一方面，宇宙也不能比100亿年老太多，由于在遥远的将来恒星的所有燃料会被用光，而我们需要热的恒星来维持我们。因此宇宙必须是大约100亿年那么老。那不是极端精密的预言，但它是真的——根据现有资料，大爆炸发生于大约137亿年之前。

正如宇宙年龄的情形，人择预言对于一个给定物理参量通常产生一个值的范围而非精确地给定它。那是因为我们的存在尽管不需要某些物理参量的特殊值，它都经常依赖于其值不偏离我们实际发现的太远的这类参数。此外，我们预料我们世界中的实际条件通常在人择允许的界限之内。例如，如果只有适度的轨道偏心率，比如讲在0和0.5之间允许生命，那么0.1的偏心率就不应该使我们惊讶，因为在宇宙的所有行星之中，也许有相当大比率的行星拥有偏心率那么小的轨道。但倘若结果是地球在一个接近完美的，具有比如说0.00010001000101偏心率的圆周上运行，那就的确会使地球变成非常特殊的行星，并且促使我们试图解释为何我们发现自己生活在如此反常的家园。这个思想有时被称作平庸原理。

与行星轨道形状、太阳质量等有关的幸运巧合被称为环境巧合，这是因为它们是从我们周围意外的好运而非从自然基本定律中的侥幸的机会产生。宇宙的年龄也是一个环境因素，在宇宙的历史中存在更早或更晚的时间，但因为这个时代是仅有的有助于生命的时代，因而我们必须

生活在此时代。因为我们的栖息地只是许多在宇宙中存在的一个，而显然我们必须在一个支持生命的栖息地存在，所以环境巧合很容易理解。

弱人择原理没有多少可争议的。但是存在一种较强的形式，我们将在这里论证，尽管一些物理学家很轻视它。强人择原理提议，我们存在的事实不仅对我们的环境而且对自然定律的可能形式和内容本身都加以限制。产生这种思想的原因是，似乎奇妙地有助于人类生命发展的不仅是太阳系罕有的特征，而且是我们整个宇宙的特征，解释后者要困难得多。

具有氢、氦和一点点锂的太初宇宙如何演化成一个庇护至少一个拥有像我们这样的智慧生命的世界这个故事可写成宏篇巨著。正如我们先前提到的，自然力必须如此，使较重的元素——尤其是碳——能从太初元素产生，并且至少在几十亿年期间保持稳定。既然那些重元素是在我们叫做恒星的火炉里形成，那么力首先必须允许恒星和星系形成。而它们是由早期宇宙细微不均匀性的种子发展成的，早期宇宙除了令人感恩地包含大约十万分之一的密度变化外，几乎是完全均匀的。然而，单是恒星的存在，还有我们由之构成的在那些恒星之中的元素的存在还是不够的。恒星的动力学必须使得有些恒星会最终爆炸，此外还要精准地以一种能把重元素散落到太空去的方式爆炸。还有，自然定律必须要求那些残余能凝聚成新一代恒星，而又有行星纳入了新形成的重元素，环绕着这些恒星运转。正如为了让我们得以发展，早期地球必须发生某些事件，这个链条的每一环节对于我们之存在也都是必需的。但在引起宇宙演化的事件的情形，这类发展被基本自然力的平衡所制约，正是那些交互作用的力必须恰好使我们得以存在。

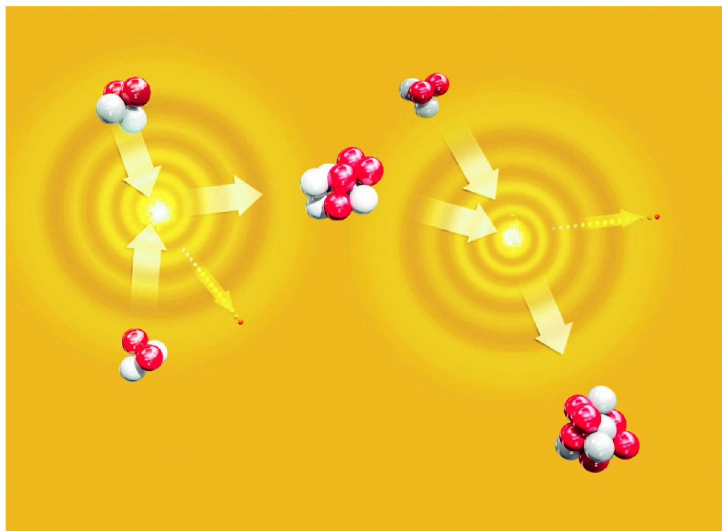
这也许牵涉好多意外发现的好运气。弗雷德·霍伊尔是1950年代首先认识到这一点的一位。霍伊尔相信，所有化学元素最初都是由氢形成的，他觉得氢是真正的太初物质。氢具有最简单的原子核，只包含一个质子，它要么单独，要么和一两个中子结合。（具有相同数目的质子，但具有不同数目的中子的不同形式的氢或任何其他元素的核素称为同位素。）氦和锂的原子的核包含两个和三个质子。我们今天知道，氦元素和锂元素也是太初合成的，那时宇宙年龄大约为200秒，合成的数量要少得多。另一方面，生命依赖于更复杂的元素。其中碳最重要，它是整个有机化学的基础。

虽然人们也许将诸如从其他元素比如硅造出的智慧电脑当做“活”的

生物，然若没有碳，生命能否自发地演化出来却是令人怀疑的。其原因是技术性的，但必定与碳和其他元素结合的唯一方式有关。例如：二氧化碳在室温下呈气态，并在生物学上非常有用。在元素周期表上硅处于碳的正下方，可见它具有类似的化学性质。然而，二氧化硅即石英在岩石的构成上比在生物的肺中远为有用，尽管如此，也许会演化出某种生命形式，它们可以靠吃硅存活并且在液氨池子里有节奏地扭动尾巴。然而，就是这种怪异的生命也不能仅从太初元素演化而来，因为那些元素只能形成两种稳定的化合物——氢化锂，这是无色的结晶固体；还有氢气：它们都不能谈情说爱，更谈不上生儿育女了。况且，事实依然是，我们是碳的生命形式，碳的核包含6个质子，而这引起了碳和我们身体中的其他重元素如何被创造的问题。

第一步发生于较老的恒星开始积聚氦时，氦是当两个氢核碰撞并相互融合而产生的。这种聚变正是恒星制造使我们温热的能量的方式。然后，两个氦原子碰撞又形成铍，这是核包含4个质子的原子。一旦铍形成了，原则上它可能和第三个氦核融合而形成碳。然而这样的事并未发生，因为形成的铍的同位素几乎立即衰变回氦核。

当一个恒星的氢开始被用尽时，情况改变了。那时，恒星的核坍缩，直至其中心温度升至大约1亿开。在那些条件下，核相互间如此频繁遭遇，使得一些铍核在有机会衰变之前即和一个氦核碰撞。那时铍可和氦融合形成碳的一种稳定的同位素。可是从那个碳到形成能享受一杯波尔多葡萄酒，抛耍燃烧的保龄球木瓶，或者诘问有关宇宙问题的那类化合物的有序结合，还有很长的路要走。为了人类这样的生命能存在，碳必须从恒星内部被移到更友好的邻近。正如我们说过的，那就是当恒星在它的生命循环的终点作为超新星爆发，抛出碳和其他重元素时完成了这一步，抛出的这些物质后来凝聚成行星。



三阿尔法过程

碳是在恒星中由3个氦核碰撞形成，若非核物理定律的一种特别性质，这种事件发生的可能性极小。

碳创生的这一过程被称为三阿尔法过程，因为“阿尔法粒子”是涉及的氦同位素的核的另一个名字，而且这个过程需要它们中的三者（最终）融合在一起。通常的物理学预言，通过三阿尔法过程产生碳的速率应该是非常小的。注意到这一点，1952年霍伊尔预言，一个铍核和一个氦核的能量之和必须与要形成的碳的同位素的某一量子态的能量几乎精确相等，这种情景称为共振，它极大地提高了核反应的速率。那时还不知道有这种能级，然而在霍伊尔创议的基础上，加州理工学院的威廉·福勒探索并找到了它，为霍伊尔关于复合核如何被创生的观点提供了重要支持。

霍伊尔写道：“我不相信任何考察此证据的科学家会得不出推论：核物理定律乃是顾及它们在恒星内部产生的后果而被有意设计的。”在那个时候，无人有足够的核物理知识，得以理解由这些精确物理定律导致的是何等意外的运气。可是，近年物理学家在研究强人择原理的有效性时，就开始寻问，如果自然定律不同的话，宇宙会变成什么模样。我们今天可以创造电脑模型，它能告诉我们三阿尔法反应速率如何依赖于基本自然力的强度。这种计算显示，只要在强核力的强度上哪怕改变0.5%，或者电力哪怕改变4%，就会在每个恒星中要么几乎毁灭全部碳，要么毁灭全部氧，因而毁灭了我们所知的生命的可能性。只要稍微改变我们宇宙的那些规则，我们存在的条件就消失了！

以某些方式改变物理学理论并对如此所产生的模型宇宙加以审视，我们能够系统地研究这些改变对物理定律所引起的效应。结果发现，不仅强核力和电磁力的强度是为我们的存在而量身定做的。在以下意义上，我们理论中的大多数基本常数显得都经过了仔细微调，如果它们哪怕被小量改变，宇宙就会有质的不同，在许多情况下不适于生命发展。如果其他核力，比如弱力弱得更多，那么早期宇宙所有的氢都会转变为氦，因而不存在正常恒星；如果它强得多，爆发的超新星就不会喷出外壳，因而就不能在星际空间撒播下行星抚育生命所需的重元素的种子。如果质子只要比现在重0.2%，它们就会衰变成中子，使原子不稳定。只要构成质子的各类夸克的质量总和改变10%这么一点点，那么我们由之组成的稳定的原子核就要少得多；事实上，夸克的质量总和对于最大量稳定核的存在似乎是最佳的。

如果人们假定，对于行星生命之演化，几亿年的稳定轨道是必需的，那么空间维度的数目也被我们的存在所固定。那是因为，根据引力定律，只有在三维时，稳定椭圆轨道才有可能。在其他维度中，圆周轨道是可能的，但正如牛顿担心的，它们会是不稳定的。对于除了三维的任意维，甚至一个小干扰，例如由其他行星的拉力产生的小干扰，就会迫使行星脱离其圆周轨道，并使之要么旋入要么旋离太阳，这样我们要么被烧化要么被冻死。还有，在多于三维时，两个物体间的引力会减弱得比在三维时更快。在三维时，当距离加倍时引力减小到1/4。在四维时，减小至1/8，在五维时，减小到1/16，等等。因而，在多于三维时，太阳不能在一种稳定的状态，即其内压平衡引力吸引的状态下存在。它要么会解体，要么会坍缩形成一个黑洞，任何一种后果都不会让你开心。在原子的尺度下，电力的行为和引力一样。那意味着原子中的电子要么会逃离，要么旋进核去。在任一种情形下，如我们所知的原子都是不可能的。

能够支持智慧观察者的复杂结构的出现似乎是非常脆弱的。自然定律形成了一个极端微调的系统，如要不毁灭我们所知的生命发展的可能性，物理定律能被改变的程度是非常小的。若非在物理定律的精确细节上的一系列令人吃惊的巧合，人类和类似的生命形式似乎永远不可能形成。

最令人印象深刻的微调巧合牵涉到爱因斯坦的广义相对论方程中所谓的宇宙常数。正如我们说过的，当他于1915年表述该理论时，爱因斯

坦相信宇宙是静态的，也就是既不膨胀也不收缩。由于所有物质都吸引其他物质，他将一个新的反引力的力引进他的理论，以对抗宇宙向自身收缩的倾向。这个力不像其他力那样来自任何特殊的源，而是植入时空的肌理本身。宇宙常数描述那个力的强度。

当发现宇宙不是静止时，爱因斯坦从他的理论中除去了宇宙常数，并声称将其纳入是他一生最大的错误。然而，1998年对非常遥远的超新星的观测揭示，宇宙正在加速膨胀，若无某种排斥力，整个空间就不可能有这个效应。宇宙常数被复活了。由于我们现在知道它的值不为零，余下的问题便成为，为何它具有现值？物理学家做出了论证，解释它如何可能因量子力学效应而出现，但他们计算的数值大约比由超新星观测得到的实际数值强120个数量级（或者1后面跟120个0）。这就意味着，或是在计算中使用的推理错了，不然就是存在着另外某种效应神奇地对消了计算值的一切，只剩下一个无法想象的小的微量。有一件事可以肯定：如果宇宙常数的值比现值大得多，我们的宇宙就会在星系形成之前自己爆炸开来——又一次——就我们所知的生命是不可能的。

我们从这些巧合中得出什么结论呢？物理基本定律的精确形式与性质中的运气，跟我们在环境因素中碰到的幸运不是一码事。它不可能被轻而易举地解释，而具有深刻得多的物理和哲学含义。我们的宇宙及其定律就像是一种设计，两者都是为支持我们而量体裁制的，如果我们要存在，改变的余地就很小。这是不容易解释的，而且自然地引起了为何它是这样的问题。

很多人愿意我们利用这些巧合作为上帝工作的证据。宇宙是上帝设计来供人类居住的观念出现在几千年以来直至现代的神学和神话之中。玛雅人的人神不分的波波武经里说，神正式宣布：“直到具有灵性的人类存在，我们才为我们创生和形成的一切接受名誉和尊敬。”公元前2000年的典型的埃及文字写道：“人，上帝的畜生，已经被很好地供养。他（太阳神）为他们创造了天地。”在中国道教哲学家列御寇（约公元前400年）借一个故事中人物之口说道，“天之于民厚矣！殖五谷，生鱼鸟以为之用。”

在西方文化中，旧约圣经在其创生故事中本来就包含了神意设计的思想，然而亚里士多德也极大地影响了传统基督教的观念，他深信一个有智慧的自然世界，根据某种深思熟虑的设计而运行。中世纪基督教神学家托马斯·阿奎那利用亚里士多德关于自然秩序的思想来论证上帝之存

在。在18世纪，另一位基督教神学家甚至走到这么远，说兔子之所以有白色的尾巴是让我们容易射中它们。几年前，维也纳的总主教克里斯托夫·舍本恩红衣主教对基督教观点给出更加摩登的诠释，他写道："现在，当21世纪之初，面临着诸如新达尔文主义和宇宙学中的多宇宙假设等新的科学主张——造作这些主张，就是为了避免现代科学所发现的有关目的和设计的压倒性证据——天主教会将正式宣布自然的内在设计是真实的，以再次捍卫人性。"这位红衣主教所指的宇宙学中有关目的和设计的压倒性证据，即是我们上面描述的物理定律的微调。

哥白尼的太阳系模型是科学拒绝人类中心宇宙的转折点，地球在该模型中不再占据中心位置。具有讽刺意味的是，哥白尼自己的世界观却是神人同形的，甚至到了这种程度，为了安慰我们，他指出尽管有他的日心模型，地球仍几乎处于宇宙的中心："虽然（地球）不处于世界的中心，其（离开中心的）距离尤其在和恒星间的距离相比较时算不了什么。"随着望远镜的发明，通过在17世纪的观测，诸如我们并非唯一一个拥有月亮的行星之类的事实，强烈支持我们在宇宙中不占据优越位置的原理。在随后的几个世纪里，我们对宇宙发现得越多，似乎越显得地球可能只不过是一颗平凡的行星。然而，较为晚近的发现表明，这么多自然定律被极端地微调到适于我们生存，这至少可使我们中的某些人有点回到这个大设计是某一伟大设计者的作品的旧观念。由于美国不准在学校里教宗教，所以这类思想被称为智慧设计，不明说但隐含的意义是该设计者为上帝。

那却不是现代科学的答案。我们在第五章中看到，我们的宇宙似乎是许多宇宙中的一个，每一个都拥有不同的定律。多宇宙思想不是为了解释微调的奇迹而发明出来的。它是无边界条件还有现代宇宙学中其他许多理论的一个顺理成章的结果。然而如果它是正确的，那么强人择原理就可被认为有效地等同于弱人择原理版本，将物理定律的微调放在和环境因素同样的立足点上，因为它意味着我们的宇宙栖息处——现在是整个可观测的宇宙——只是许多个中的一个，正如我们的太阳系是许多中的一个一样。这意味着，多宇宙的存在可能解释自然定律的微调，其方式和意识到存在类似太阳系的亿万个系统，使得我们太阳系的环境巧合变得寻常一样。长期以来，许多人将在他们的时代似乎得不到科学解释的自然之美与复杂性归功于上帝。然而，正如达尔文和华莱士不用一个至高存在的干涉去解释生命形式看来奇迹般的设计能够出现，多宇宙概念也可以解释自然定律的微调，而不需要一个为我们制造宇宙的仁慈

的造物主。

有一次爱因斯坦诘问助手恩斯特·斯特劳斯：“上帝在创造宇宙时有任何选择吗？”在16世纪后期，开普勒坚信，上帝根据某种完美的数学原则创造了宇宙。牛顿证明，适用于天穹的定律也同样适用于地球，并研究出了表达那些定律的数学方程，这些方程是如此优雅，甚至几乎激起了18世纪许多科学家的宗教热诚，他们似乎想用它们来证明，上帝是一名数学家。

自从牛顿，特别是爱因斯坦以来，物理学的目标已是去发现开普勒摹想的那种简单的数学原则，并利用它创造一个万物的统一理论，该理论将解释我们在自然中观察的物质和力的所有细节。在19世纪末和20世纪初，麦克斯韦和爱因斯坦统一了电磁和光的理论。1970年代，标准模型被创造出来，这是一个强核力和弱核力以及电磁力的统一理论。后来，弦理论和M理论出现，试图去包括余下的力，即引力。其目标是找到一个单一理论，希望它不仅能解释所有力，而且能解释我们一直谈论的一些基本数，比如各种力的强度和基本粒子的质量与荷。正如爱因斯坦所说，希望在于能够说“自然是这样构成的，可能逻辑地设计这么坚确的定律，以至于在这些定律之中只有合理地完全被确定的常数存在（因此，不是那些在不毁灭理论的前提下数值可被改变的常数）”。一个唯一的理论不大可能配了微调以允许我们的存在。但是鉴于目前的进步，我们如果将爱因斯坦之梦解释为找到唯一的理论，该理论解释这个和其他宇宙及其不同定律的整个谱系，那么M理论可能就是那个理论。然而，M理论上是唯一的吗？或者它是由任何简单的逻辑原则所要求的吗？我们能回答这个问题吗？为什么是M理论而不是别的理论？

第八章　伟大设计



在本书中，我们描述了像太阳、月亮和行星等天体，它们的有规律的运动如何暗示，它们是由一定的定律制约而非受神魔奇思怪想的驱动。起初这样的定律只在天文学（或占星学，这两样曾被认为是大同小异）中明显存在。地球上万物的行为是如此复杂并且受到这么多影响，使得早期文明不能够辨别出任何统辖这些现象的清楚模式或定律。然

而，在天文学之外的其他领域中，新定律被渐次发现，而这导致了科学决定论的思想：必定存在一整套定律完备集合，只要给定宇宙在某一特殊时刻的状态，它们就指明宇宙从那个时刻往前将如何发展。这些定律应在任何地方、任何时刻都成立；否则的话它们就不是定律。不可能有例外或者奇迹。神祇或魔怪都不能干涉宇宙的运行。

在科学决定论首次提出的年代，人们知道的自然定律只有牛顿的运动定律和引力定律。我们描述了爱因斯坦在其广义相对论中如何推广这些定律，以及人们如何发现制约宇宙中其他方面的其他定律。

自然的定律告诉我们宇宙如何行为，但它们并未回答我们在本书开头提出的为何的质问：

为何存在实在之物而非一无所有？

为何我们存在？

为何是这一套定律而非别的？

有人会宣称这些问题的答案是上帝之存在，是他选择以那种方式创造了宇宙。询问何人或何物创造了宇宙是合理的，倘若答案是上帝，那么问题只不过是被转换成谁创造上帝的问题。按照这种观点，存在某种不需要造物主的实体，而那个实体称作上帝，这就可接受了。这就是众所周知的对上帝存在的第一原因论证。然而我们宣布，纯粹在科学的王国中，而不必乞求任何神即能回答这些问题。

根据第三章引进的依赖模型的实在论的思想，我们的头脑通过对外部世界作一个模型来解释来自感官的输入。我们形成了房子、树、其他人、从墙上电源流出的电、原子、分子以及其他宇宙的心理概念。这些心理概念是我们所能知道的仅有的实在。不存在不依赖模型的实在性检验。由此推出，一个构建良好的模型创生自身的一个实在。1970年，剑桥的一位名叫约翰·康威的年轻数学家发明的生命游戏便是一个帮助我们思索实在和创生问题的例子。

在生命游戏中，“游戏”这个词是个误导的术语。不存在赢者和输者；事实上其中不存在游戏者。生命游戏不是真正的游戏，只不过是制约一个两维宇宙的一组定律。它是一个决定性的宇宙：一旦你设立起始构形，或初始条件，定律确定在将来发生什么。

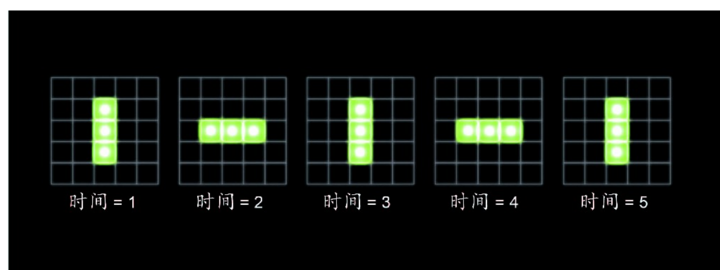
康威猜想的世界是一个方形排阵，像一个棋盘，但在所有方向上无限延伸。每个方块可处于2个态中的1个：活（在下图中用绿色标示）或死（在下图中用黑色标示）。每个方块有8个邻居：上、下、左、右以及4个对角邻居。在这个世界中时间不是连续的，而是向前以分立的步骤前进。在给定的任何死生方块的位形下，活邻居的数目根据下列规则确定下一步发生什么：

1.一个具有两或三个活邻居的活方块存活（存活）。

2.刚好具有3个活邻居的死方块成为活细胞（诞生）。

3.在所有其他情形下，一个细胞死去或保持死亡。在一个活的方块具有零或一个邻居的情形下，就说死于孤独；如果它有多于3个邻居，就说死于拥挤。

这就是全部：给定任何初始条件，这些规则就使排阵一代一代地延续下去。一个孤立的活方块或者两块毗连的活方块在下一代死亡，因为它们没有足够的邻居。3个沿着对角方向的活方块活得久一些。在第一步后端点的方块死了，只留下中间的方块，它在后面接着的那一代死去。任何方块的对角线就以这种方式“蒸发”了。倘若3个活方块放在水平的行上，中间的又因有两个邻居而存活，而两端的方块死亡，但在这个情形下，刚好位于中间上方和下方的细胞经历了诞生。因此行变成了列。类似地在下一代列又回到了行，等等。这种来回振荡的形状称作眨眼。

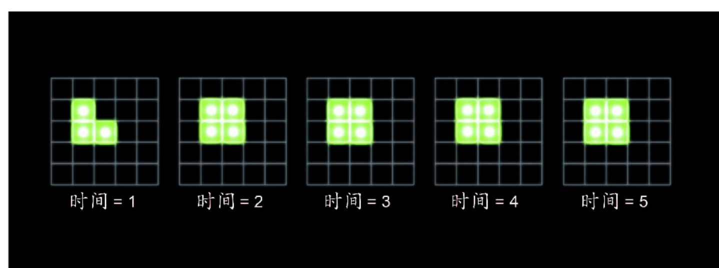


眨眼

眨眼是生命游戏中一种简单类型的复合体。

如果3个活方块摆成L形状，就会发生新的行为。在下一代被L抱着的方块会诞生，导致一个2×2的方砖。方砖属于称作静止生命的模式类，因为它会照原样不变地一代代传下去。有许多构形都像这样，先是

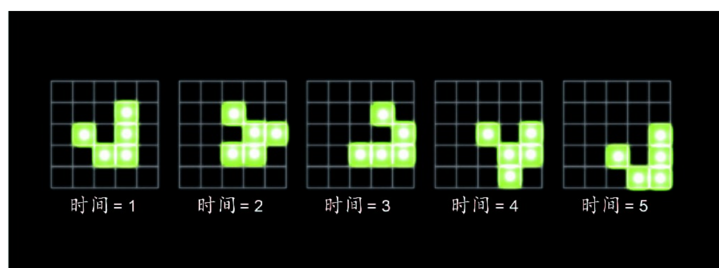
变形，数代之后很快转成静止生命，或者死去，或者回到原先的形态而后重复这过程。



向静态生命的演化

在生命游戏中某些复合体演化成一种形态，按规则要求，这种形态永不改变。

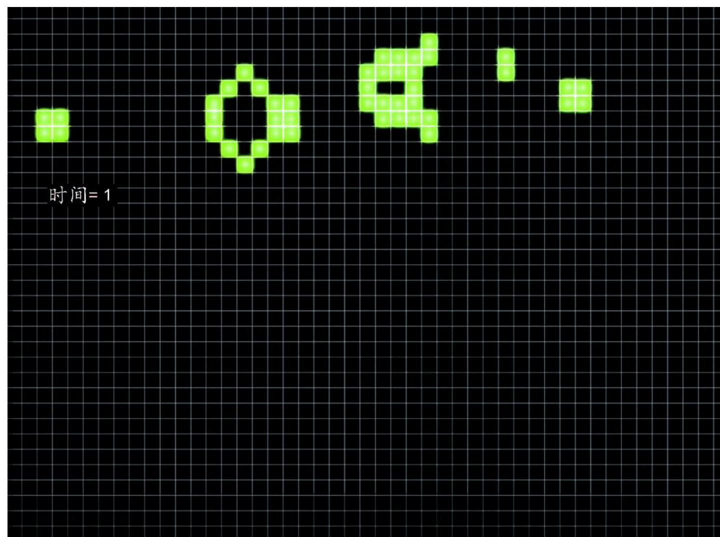
还存在滑翔器的模式，它变体成其他形状，几代之后，回到原先的形状，但在位置上沿着对角方向向下移动一个方块。如果你观察这些东西随着时间的发展，它们仿佛沿着阵列爬行。当这些滑翔器发生碰撞时，可发生古怪的行为，依碰撞时每个滑翔器的形状而定。



滑翔器

滑翔器通过这些中间形状而变体，然后回到原先的形态，并沿着对角方向移动一个方块。

尽管这个宇宙的基本“物理”很简单，其“化学”可很复杂，使得这个宇宙很有趣。也就是说，存在不同尺度的复合对象。在最小的尺度上，基本物理告诉我们，只存在活的和死的方块。在较大尺度上，存在滑翔器、眨眼和静止生活的砖块。在更大的尺度上，甚至存在更复杂的对象，诸如滑翔枪：这是一种稳态的模式，它周期性地生养新的滑翔器，后者离开巢沿对角线方向射去。



滑翔枪的初始形状

滑翔枪大体是滑翔器10倍那么大。

如果你在任何特别尺度上对生命游戏的宇宙观察一回，你就会推知制约那个尺度的对象的定律。例如：在断面只有几个方块的对象的尺度上，你也许拥有诸如“砖头永不运动”、“滑翔器对角移动”，以及当对象相撞时发生什么等各种定律。你可以在复合体的任何水平上创造一整套物理学。这些定律需要用在原先定律中不存在的实体和概念来描述。例如，在原先的定律中没有诸如“碰撞”或“运动”的概念。那些定律只描述个别稳态方块的生与死。正如在我们的宇宙中一样，在生命游戏中你所把握的实在依赖于你使用的模型。



116代后的滑翔枪

滑翔枪随时间改变形状，发射出滑翔器，然后回到它的原先形态和位置，循环往复，以至无穷。

康威和他的学生之所以要创造这个世界，是因为他们想知道，具有简单到他们定义的基本规则的一个宇宙能否包含复杂到足以复制自己的对象。在生命游戏世界中，是否存在这种复合体，它仅仅在遵循那个世界定律几代之后，将会复制出自己种类的对象？康威和他的学生不仅能展示这是可能的，甚至还证明这样的对象在某种意义上是智慧的。我们在这里讲的智慧是什么意思呢？准确地讲，他们证明了，能自我复制的巨大的方块凝聚是一些“普适图灵机”。就我们的目的而言，这意味着，对于我们物理世界中的一台电脑原则上能够进行的计算，给这台机器以适当的输入——也就是为生命游戏提供适当的世界环境——那么几代之后机器就会处于一个状态，从该状态可以读到输出，它对应于那个电脑算出的结果。

为了稍微了解一下那如何实现，可以试想当滑翔器被射到活方块的简单的2×2方砖上会发生什么。如果滑翔器以恰好的方式靠近方砖，一直稳态的方砖就会凑向或远离滑翔器的射源。方砖能以这种方式模拟电脑记忆。事实上，一台现代电脑的所有基本功能，诸如与门和或门，也能从滑翔器创生。这样，正如在物理电脑中利用电信号发送和处理信息一样，也可以这种方式利用滑翔器的流动序列去发送和处理信息。

在生命游戏中，正如在我们的世界中，自繁殖模式是一些复杂的对

象。基于数学家约翰·冯·诺依曼早先的工作，有一种估计认为，在生命游戏中，能够自我复制的模块，其最小尺度是十万亿个方块——大约为人的一单个细胞中分子的数目。

人们可以将生物定义为稳定并能复制自身的尺度有限的复杂系统。上述的对象满足了复制条件，但也许还不稳定：从外界来的微小扰动也许会毁灭那脆弱的机制。然而，很容易想象，稍微复杂的定律会容许具有生命所有特性的复杂系统出现。想象那种类型的一个实体，一个康威那种世界中的对象。这样的对象会对外界的刺激有反应，因此显得在做决定。这样的生命会有自我意识吗？这是一个有关意见极端对立的问题。有些人宣布自我意识是人类独有的东西。是它给人以自由意志，也就是选择不同行动方针的能力。

人们何以断定一个存在是否具有自由意志？如果人们邂逅一个外星人，何以断定它只不过是一个机器人，还是拥有自己的精神？机器人的行为是完全被确定的，不像具有自由意志生物的行为。这样，原则上，人们就凭其行为能被预言即可检测出它是个机器人。正如我们在第二章中说过的，如果该存在很大很复杂，就或许困难得实现不了。我们甚至不可能精确地解3个或更多相互作用的粒子的方程。由于具有人的尺度的外星人大约会包含一千亿亿亿个粒子，即便外星人是一个机器人，我们也不可能解这方程并预言其要做什么。因此，我们只好说，任何复杂存在都具有自由意志——不作为一个基本的特性，却作为一个有效理论，承认我们没能力通过计算预言其行为。

康威生命游戏的例子显示，甚至一组非常简单的定律就能产生类似于智慧生命所拥有的复杂特征。一定存在许多套具有这种性质的定律。是什么把制约我们宇宙的基本定律（和表观定律相反）挑出来？正如在康威宇宙中，给定在任何一个时刻的状态，我们宇宙的定律即确定系统的演化。我们是康威宇宙的造物主——我们在游戏的起始处指定对象及其位置，由此选择宇宙的初始状态。

在物理的宇宙中，对应于生命游戏中的滑翔器之类对象的是一些孤立的物体。任何一组描述像我们自己这样的连续世界的定律都拥有一个能量概念。这是一个守恒的量，它不随时间而变化。真空的能量必须是常量，既与时间无关，也与位置无关。人们测量空间中任何体积的相对于真空的同一体积能量，由此减除这个常真空能，这样我们不妨宣布这个常量为零。任何自然定律都必须满足的一个要求是，它要求一个由真

空环绕的孤立体的能量是正的，这意味着人们要把它聚合到一起必须做功。那是因为，假如一个孤立体的能量为负，那么它就能在一种运动的状态下被创生出来，由是其负能量就可被因其运动而具有的正能量准确地平衡。如果这是真的，那就难保物体不能在任何地方和所有地方出现。那样，真空就会不稳定。但是，倘若创生一个孤立物体要花费能量，这种不稳定性就不会发生，因为正如我们说过的，宇宙的能量必须守恒。就是需要这个来保证宇宙局部稳定——保证东西不可能处处从无出现。

如果宇宙的总能量必须总保持为零，而创生一个物体要消耗能量，那么，整个宇宙怎么能从无中创生呢？这就是必须存在像引力定律这样的定律的原因。因为引力是吸引的，引力能是负的：人们必须做功才能把引力束缚的系统诸如地球和月亮分离。这个负能量能平衡创生物质所需的正能量，但事情绝非如此简单。例如，地球的负的引力能比地球由之构成的物质粒子的正能量的十亿分之一还小。像恒星这样的物体会有更大的负引力能，而恒星越小（它的不同部分相互靠得越近），其负引力能就越大。然而，在它变得大于物质的正能量之前，该恒星一定坍缩成一个黑洞，而黑洞具有正能量。这就是为什么真空是稳定的。诸如恒星和黑洞这样的物体不能就从无中出现。然而整个宇宙却能。

因为引力塑造了空间和时间，它允许时空局部稳定但全体不稳定。在整个宇宙的尺度下，正的物质能量可被负的引力能量所平衡，这样对于整个宇宙的创生并未添加任何限制。由于存在引力定律那样的定律，宇宙能够并且将以在第六章中描述的方式从无之中把自己创生出来。自发创生是存在实在之物而非一无所有，为什么宇宙存在，为什么我们存在的原因。不必要祈求上帝点燃导火索使宇宙运行。

为什么基本定律像我们描述的那样？终极理论必须自洽而且对我们能测量的量必须预言有限的结果。我们已经看到，必须存在像引力定律那样的定律，而且我们在第五章中看到，为了使引力论能预言有限的量，该理论在自然力和它作用于其上的物质之间必须具有所谓的超对称。M理论是最一般的超对称的引力论。由于这些原因，M理论是宇宙的完备理论的仅有候选者。如果它是有限的——这还有待证明——它就是一个自创生宇宙的模型。我们必须是这个宇宙的部分，因为不存在其他一致的模型。

M理论是爱因斯坦所希望找到的统一理论。人类——我们自身只不

过是自然的基本粒子的集聚——已经能够这么接近地理解制约我们和我们宇宙的定律，这一事实就是一项伟大的胜利。但真正的奇迹也许在于，逻辑的抽象思考导致一个唯一的理论，它预言和描述了我们所看到的充满令人惊异的千姿百态的浩瀚宇宙。如果该理论被观测所证实，它就将是过去3000多年来一场智力探索的成功终结。我们就可以说找到那个大设计了。

小辞典

可择历史

量子论的一种表述，其中任何观测的概率均由所有能导致该观测的可能历史所构成。

人择原理

一种思想，认为我们基于我们存在这一事实即能得出有关物理表观定律的结论。

反物质

每种物质粒子都有相应的反粒子。如果相遇，它们就相互湮没，只余下纯粹能量。

表观定律

我们在我们宇宙中观察到的自然定律——4种力的定律以及诸如表征基本粒子的质量和荷的参数——与称为M理论的更基本定律相对而言，后者允许具有不同定律的不同宇宙。

渐近自由

强力的一个性质，这一性质使强力在短距离下变弱。因此，虽然夸克在核子中被强力束缚，它们在核中仍可能运动，犹如它们根本没有受力一样。

原子

通常物质的基元，包含一个具有质子和中子的核，周围有电子绕核公转。

重子

诸如质子和中子的一类基本粒子，由3个夸克构成。

大爆炸

宇宙的紧致、灼热的开端。大爆炸理论设想，在大约137亿年前，我们今天能看到的这部分宇宙只有几毫米宽。现在宇宙变得非常大非常凉，然而我们能在弥漫于整个太空的宇宙微波背景辐射中观察到那个早期宇宙的残余。

黑洞

时空的一个区域，由于它极大的引力而与宇宙的其余部分隔离。

玻色子

携带力的基本粒子。

从底往上方法

在宇宙学中，依赖以下假设的思想，即存在单一的宇宙历史，该历史具有明确定义的起始点，而且现在宇宙的状态是从那个起始点演化而来。

经典物理

物理学的任何理论，在该理论中假设宇宙具有单一的明确定义的历史。

宇宙常数

爱因斯坦方程中予时空以固有膨胀倾向的一个参数。

电磁力

4种自然力中的第二强的力。它作用于具有电荷的粒子之间。

电子

物质的一种基本粒子，它具有负电荷，而且负责元素的化学性质。

费米子

物质型的基本粒子。

星系

由引力束缚在一起的恒星、星际物质和暗物质的大的系统。

引力

4种自然力中最弱的力。具有质量的物体正是由它来相互吸引。

海森伯不确定性原理

量子论的一个定律，它是讲某些成对的物理性质不能同时在任意精度上被测知。

介子

一类基本粒子，由夸克和反夸克构成。

M理论

物理学的基本理论，它是万物理论的一个候选者。

多宇宙

一族宇宙。

中微子

一种极轻的基本粒子，只受弱核力和引力的作用。

中子

一类电中性的重子，与质子一起形成原子核。

无边界条件

条件要求，宇宙的历史是没有边界的闭合面。

相位

在波的循环中的位置。

光子

携带电磁力的玻色子。光的量子粒子。

概率幅度

量子论中的一个复数，其绝对值的平方给出概率。

质子

一类带正电荷的重子，它与中子构成原子核。

量子论

一种理论，在那个理论中，物体不具有单一明确的历史。

夸克

具有分数电荷的基本粒子，它感受强力。质子和中子各由3个夸克组成。

重正化

设计来使在量子论中产生的无限具有意义的数学技艺。

奇点

时空中的点，在该处物理量变成无穷大。

时空

一种数学空间，它的点必须既被指明空间坐标又被指明时间坐标。

弦论

物理学的理论，其中粒子被描述成振动的模式，振动具有长度却无高度或宽度——就像一段无限细的弦。

强核力

4种自然力中最强的力。这种力在原子核中把质子和中子束缚在一起。它还把质子和中子自身束缚在一起，因为它们是由更微小的粒子夸克组成，所以它是必需的。

超引力

引力论的一种，它拥有一种称作超对称的对称。

超对称

一种微妙的对称，它不能和通常空间的变换相关。超对称的一个重要含义是力粒子和物质粒子，也因此力和物质实际上只是同一件东西的两个方面。

从顶往下方法

宇宙学的方法，在这方法中人们“从顶往下”，也就是从现在往过去追踪宇宙历史。

弱核力

4种自然力的一种。弱力负责放射性并在恒星以及早期宇宙的元素形成中起极重要的作用。

感谢

宇宙有一个设计，书也有一个。然而和宇宙不同，书不会从无中自发出现。一部书需要一个创造者，其角色并非全部落到作者的肩膀上。因此，首先也是首要，我们愿意感谢我们的编辑BethhRashtaum和AnnhHarris的近乎无限的耐心。我们需要学生时，她们是学生，我们需要老师时，她们是老师，而我们需要激励时，她们是激励者。她们专心致志、兴高采烈地处理手稿，不厌其烦地与我们商讨，无论是关于把逗号放在何处，还是关于不可能把负曲率的面轴对称地嵌入平坦空间中。我们还想感谢：MarkhHillery，多承他阅读了手稿的大部分并提供了有价值的意见；CarolehLowenstein，她对版式设计帮助良多；DavidhSteven-son，他指导完成封面设计；LorenhNoveck，她的细致免除了许多在付印之前我们不愿见到的打印错误。非常感谢Peterh Bollinger：你以插图的形式将艺术带给科学，你勤勉地保证每个细节之准确。还要感谢SidneyhHarris：感谢你的美妙卡通以及你对科学家面临问题的高度敏感。我们还因为得到的支持和鼓励感激我们的代理人AlhZuckerman和SusanhGinsburg。如果有两条启示是他们一直提供的，那便是“早到了完成此书的时候了”和“不要介意何时完成，你们最后总能完成”。他们足够明智，知道什么时候该说哪个。而最后，我们感谢史蒂芬的个人助理Judithh Croasdell；他的电脑助手SamhBlackburn以及JoanhGodwin。他们不仅提供了精神支持，还提供了体力上和技术上的支持，若无这些支持，我们就写不完这本书。此外，他们总知道去何处找到最好的酒吧。

十问

霍金沉思录

[英] 史蒂芬·霍金 著
吴忠超 译



BRIEF ANSWERS TO THE BIG QUESTIONS

Stephen Hawking



霍金先生
最后的著作
留给世界
最宝贵的礼物

《纽约时报》
畅销书
《卫报》《连线》
年度图书

CTS 湖南科学技术出版社

1
Is there a God?
上帝存在吗？

2
How did it all begin?
一切如何开始？

3
Is there other intelligent life in the universe?
宇宙中存在其他智慧生命吗？

4
Can we predict the future?
我们能预测未来吗？

5
What is inside a black hole?
黑洞中是什么？

6
Is time travel possible?
时间旅行可能吗？

7
Will we survive on Earth?
我们能在地球上存活吗？

8
Should we colonise space?
我们应去太空殖民吗？

9
Will artificial intelligence outsmart us?
人工智能会不会超过我们？

10
How do we shape the future?
我们如何塑造未来？

版权信息

十问：霍金沉思录

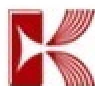
著者：（英）史蒂芬·霍金

译者：吴忠超

责任编辑：孙桂均　吴炜　李蓓　杨波

装帧设计：邵年

ISBN：9787535796943



湖南科学技术出版社
HUNAN SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS

目录

版权信息
出版者说明
Foreword：Eddie Redmayne 前言：埃迪·雷德梅恩
An Introduction：Kip S.Torne 导言： 基普·S.索恩
Why we must ask the big questions 我们为什么必须问大问题
1 Is there a God？ 上帝存在吗？
2 How did it all begin？ 一切如何开始？
3 Is there other intelligentlife in the universe？ 宇宙中存在其他智慧生命吗？
4 Can we predict the future？ 我们能预测未来吗？
5 What is inside a black hole？ 黑洞中是什么？
6 Is time travel possible？ 时间旅行可能吗？
7 Will we survive on Earth？ 我们能在地球上存活吗？
8 Should we colonise space？ 我们应去太空殖民吗？
9 Will artifcial intelligence outsmart us？ 人工智能会不会超过我们？
10 How do we shape the future？ 我们如何塑造未来？
A erword：Lucy Hawking 后记：露西·霍金
Epilogue：Huateng Ma 跋：马化腾
Notes of Translator：Hawking and the Heavenly Inquiries Zhongchao Wu 译后记：霍金和十问　吴忠超
Postface：Revisiting Hawking in Loving Memories Guijun Sun 编后记：此情只待成追忆　孙桂均
Acknowledgements 致谢

First published in Great Britain in 2018 by John Murray
(Publishers)

An Hachette UK company

1

Copyright ©Spacetime Publications Limited 2018

Foreword ©Eddie Redmayne 2018

Introduction ©Kip S.Thorne 2018

Afterword ©Lucy Hawking 2018

The right of Stephen Hawking to be identified as the

Author of the Work has been asserted in accordance with

the Copyright, Designs and Patents Act 1988.

All rights reserved.No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval

system, or transmitted, in any form or by any means without the prior written permission of

the publisher, nor be otherwise circulated in any form of binding or cover other than

that in which it is published and without a similar condition

being imposed on the subsequent purchaser.

A CIP catalogue record for this title is available

from the British Library

Hardback isbn 978-1-473-69598-6

Special edition isbn 978-1-529-34541-4

Ebook isbn 978-1-473-69600-6

Photograph of the adult Stephen Hawking ©Andre Pattenden

Text design by Craig Burgess

Typeset in Sabon MT by Palimpsest Book Production Ltd ,

Falkirk, Stirlingshire

Printed and bound by Clays Ltd, Elcograf S.p.A.

John Murray policy is to use papers that are natural, renewable and recyclable products and

made from wood grown in sustainable forests.The logging and manufacturing processes are

expected to conform to the environmental regulations of the country of origin.

John Murray (Publishers)

Carmelite House

50 Victoria Embankment

London ec4y 0dz

www.johnmurray.co.uk

史蒂芬·霍金著作

《时间简史》

《霍金讲演录》

《时间简史（插图版）》

《果壳中的宇宙》

《我的简史》

和列纳德·蒙洛迪诺合作

《时间简史（普及版）》

《大设计》

和露西·霍金合作

《乔治的宇宙：秘密钥匙》

《乔治的宇宙：寻宝记》

《乔治的宇宙：大爆炸》

《乔治的宇宙：不可破解的密码》

《乔治的宇宙：蓝月》

出版者说明

史蒂芬·霍金经常被科学家、科技企业家、高级商业人士、政治领袖和公众问及他对当前一些“大问题”的看法。史蒂芬以演讲、采访和散文的形式回答了这些问题，并保留了一份巨大的个人档案。

本书内容来自该个人档案，并在他去世前后基本成形。本书在他的学术同事、他的家人和史蒂芬·霍金遗产管理机构合作下完成。

本书的版税将按一定比例捐给慈善机构。

Foreword：*Eddie Redmayne*
前言：埃迪·雷德梅恩

几年前，我在《万物理论》中扮演史蒂芬的角色，并花了几个月时间研究他的贡献和他的残疾，试图了解如何用我的身体来表达运动神经元疾病随着时间的演变。从我的研究中，我已经熟悉他坚定的眼神和不动的身体。但我第一次见到史蒂芬·霍金时，依然被他非凡的力量和极度的脆弱所震惊。

当我终于遇见我的偶像，非凡的天才科学家史蒂芬——他与人的主要沟通是通过电脑化的声音和一对异常富有表现力的眉毛——我还是完全不知所措。在沉默中，我感到紧张，之后又说得太多，而史蒂芬绝对理解沉默的力量，就像你被仔细审视时感觉到的那种力量。慌乱中，我选择和他谈谈我们的生日，它们只相隔几天，所以我们处于同一个星座。几分钟后，史蒂芬回答说："我是天文学家，不是占星家。"他还坚持让我称他为史蒂芬，不再称他为教授，我之前已被告知过……

刻画史蒂芬的机会非同寻常。我被这个角色所吸引是因为史蒂芬的双重性：他在科学研究的同时，还要顽强地与神经元疾病作斗争。他的人生是一个独特、复杂、丰富的故事，讲述了人的努力、家庭生活、巨大的学术成就以及对各种障碍的绝对蔑视。虽然我们想要描绘灵感，但我们也希望表现史蒂芬生命中的坚韧和勇气。

但表现史蒂芬作为纯粹的表演者的一面也同样重要。在片花中，我最终得到了三张我提到的图片。一张是伸舌头的爱因斯坦，因为那里有与霍金相似的俏皮机智。另一张是演木偶戏的小丑，因为我觉得他人总是逃不出史蒂芬的手掌心。而第三张是詹姆斯·迪恩。这就是我看到他所获得的印象——闪光和幽默。

扮演一个在世的人最大的压力在于，你必须向你所表现的那个人诠释你自己的表演。而扮演史蒂芬，我还需要向他的家人诠释，而他们在我为这部电影做准备时就对我很慷慨。在史蒂芬观看试映之前，他对我说，"我会告诉你我的想法。好，或者其他。"我回答说，如果是"其他"的话，也许他只需说"其他"，不要告诉我令我难堪的细节。史蒂芬慷

慨地说他很喜欢这部电影。他被感动了。不过，众所周知，他还说他认为要是有更多的物理和更少的感受就好了。这没有什么可争议的。

自从拍《万物理论》以来，我一直与霍金家人保持联系。我被邀请在史蒂芬葬礼上朗读，为此我深为感动。这是一个令人难以置信的悲伤但辉煌的一天，充满了爱和快乐的回忆，还有对这位最勇敢的人的追思，他不仅在科学上，而且在努力使残疾人得到认可并获得茁壮成长的机会方面，他都引领世界。

我们失去了一个真正美丽的心灵，一个令人震撼的科学家和我有幸遇到的最有趣的人。但正如他的家人在史蒂芬过世时所说的，他的工作和遗产将继续延续下去。因此我悲伤地，但也非常高兴地向你介绍史蒂芬这部有关各种广泛迷人主题的集子。我希望你喜欢他所写的，引用巴拉克·奥巴马的话，我希望史蒂芬在灿烂的星空中玩得开心。

爱你的

埃迪

An Introduction：*Kip S.Torne*
导言： 基普·S.索恩

1965年7月，在英格兰伦敦举行的广义相对论和引力会议上，我首次见到史蒂芬·霍金。当时他正在剑桥大学攻读博士学位，我刚刚在普林斯顿大学获得了博士学位。在会议大厅，有传言说史蒂芬构思了一个令人信服的论点，即我们的宇宙必定在有限的过去某个时刻诞生。宇宙绝不可能无限老。

所以，我和大约100个人一起，挤进一个原定容纳40人的房间，听史蒂芬演讲。他带着拐杖走路，话语有点模糊，但除此之外，只表现出运动神经元疾病的轻度症状，他两年前刚被确诊。他的头脑显然没有受到影响。他清晰的推理依赖于爱因斯坦的广义相对论方程，以及天文学家们观察到我们的宇宙正在膨胀，还有一些似乎很可能是真实的简单假设，它还利用了罗杰·彭罗斯最近设计的一些新的数学方法。史蒂芬以巧妙、强大和引人入胜的方式将所有这些结合起来，推断出他的结果：我们的宇宙必定在大约100亿年前的某种奇异状态下开始。（在随后的十年间，史蒂芬和罗杰，同心合力继续更加令人信服地证明这个奇异的时间开端，并且更加令人信服地证明，每个黑洞的核心都拥有一个奇点，时间在该处终结。）

史蒂芬1965年的演讲给我留下了深刻的印象。不仅仅是他的论证和结论，更重要的是他的洞察力和创造力。所以我找到他，花了一小时和他私下谈话。这是我们终身友谊的开始，这种友谊不仅基于共同的科学兴趣，而且基于非凡的相互同情，一种作为人类相互理解的神奇能力。很快我们花更多时间谈论我们的生活、我们的爱甚至死亡，而不是科学，尽管科学仍然是将我们联系在一起的黏合剂。

1973年9月，我把史蒂芬和他的妻子简·王尔德带到了俄罗斯的莫斯科。尽管冷战激烈，自1968年以来，我每隔一年都在莫斯科度过一个月左右，与雅可夫·鲍里索维奇·泽尔多维奇领导的小组成员合作进行研究。

泽尔多维奇是一位出色的天体物理学家，也是苏联“氢弹之父”。由于他所知的核秘密，他被禁止前往西欧或美国。他渴望与史蒂芬讨论，

但他又不能来剑桥，所以我们去他那里。

在莫斯科，泽尔多维奇和其他数百名科学家为史蒂芬的见解而惊叹折服，史蒂芬也从泽尔多维奇那里学到了一些东西。最令人难忘的是，在罗西亚酒店，史蒂芬和我在史蒂芬的房间里与泽尔多维奇和他的博士生阿列克谢·斯塔拉宾斯基一起度过了一个下午。泽尔多维奇以直观的方式解释了他们得到的一项非凡的发现，而斯塔拉宾斯基在数学上对其进行了解释。

我们已经知道使黑洞自旋需要能量。他们解释说，黑洞可以利用其自旋能产生粒子，粒子飞走，同时携带走自旋能量。这是令人惊讶的新发现，但并不是非常令人惊讶。当一个物体具有运动能量时，自然界通常会找到一种提取它的方法。我们已经知道了提取黑洞自旋能量的其他方式；这只是一种新的方式，虽然有些意想不到。

像这样对话的巨大价值在于它们可以触发新的思维方向，对史蒂芬正是如此。他花数月时间仔细研究了泽尔多维奇与斯塔拉宾斯基的发现，先从一个方向看，然后从另一个方向看，直到有一天它在史蒂芬思想中引发了一个真正激进的洞见：在一个黑洞停止旋转之后，这个黑洞仍然可以发出粒子。它能辐射——黑洞辐射，它是热的，就像太阳一样，虽然不是很热，只是略温而已。黑洞越重，温度越低。一个太阳质量的黑洞，其温度为0.00000006开尔文，比绝对零度高一亿分之六度。计算这个温度的公式现在刻在位于伦敦西敏寺的史蒂芬的墓碑上，他的骨灰葬于艾萨克·牛顿和查尔斯·达尔文两墓之间。

这个黑洞的霍金温度及其霍金辐射（它们随后被这么称呼）是真正激进的，也许是20世纪下半叶最激进的理论物理发现。它们打开了我们的眼界，看到广义相对论（黑洞）、热力学（热物理学）和量子物理学（在原先无粒子之处创生粒子）之间的深刻联系。例如，它们导致史蒂芬证明黑洞有熵，这意味着在黑洞内部或周围的某处有巨大的随机性。他推导出熵的数量（黑洞随机性量的对数）与黑洞表面积成正比。他的熵公式刻在剑桥的龚维尔和基斯学院的史蒂芬纪念碑上，他生前在此学院工作。

在过去的45年里，史蒂芬和其他数百名物理学家一直在努力去理解黑洞随机性的确切性质。正是这个问题不断产生量子理论与广义相对论结合（也就是还未理解清楚的量子引力定律）的新洞见。

1974年秋天，史蒂芬把他的博士生和他的家人（他的妻子简和他们的两个孩子罗伯特和露西）带到加利福尼亚州的帕萨迪纳，他们在这里住了一年。这样他和他的学生就可以在我工作的大学——加州理工学院，暂时与我自己的研究小组合并，并加入我们的学术生活。这是辉煌的一年，是所谓的“黑洞研究黄金时代”的顶峰。

在那一年里，史蒂芬和他的学生以及我的一些学生奋力更深刻地理解黑洞，我在某种程度上也如此。但史蒂芬对我们的联合小组进行黑洞研究的领导，让我有自由去追求我多年来一直在思考的新方向：引力波。

只有两种类型的波可以穿越宇宙，为我们提供有关遥远事物的信息：电磁波（包括光线、X射线、伽马射线、微波、射电波……）和引力波。

电磁波由以光速传播的振荡电力和磁力组成。它们撞击带电粒子，例如无线电或电视天线中的电子，它们来回摇动粒子，在粒子中卸下波携带的信息。然后该信息可被放大并馈送到扬声器或电视屏幕以供人们理解。

根据爱因斯坦的说法，引力波由振荡的空间弯曲组成：空间的振荡拉伸和挤压。1972年，麻省理工学院的莱纳·韦斯发明了一种引力波探测器。在探测器中几个镜子被悬挂在L形真空管道的转角和两条腿的末端，其中一对镜面沿着L的一条腿的方向被空间的拉伸推离，而另一对镜面沿着另一条腿的方向被空间的挤压拉近。莱纳建议使用激光束来测量这种拉伸和挤压的振荡模式。激光可以提取引力波信息，然后信号可以被放大并送入电脑以供人理解。

伽利略发起了用电磁望远镜（电磁天文学）对宇宙的研究，当时他建造了一个小型光学望远镜，指向木星并发现木星四个最大的卫星。从那时起的400年间，电磁天文学彻底变革了我们对宇宙的理解。

1972年，我和我的学生们开始思考可以利用引力波了解宇宙什么：我们开始发展引力波天文学的一个领域。因为引力波是空间弯曲的一种形式，能最强烈产生引力波的物体本身应该完全或部分由弯曲的时空引起——这尤其意味着应由黑洞引起。我们得出结论，引力波是探索和检验史蒂芬对黑洞洞见的理想工具。

在我们看来，引力波与电磁波完全不同，它们几乎可以保证为我们理解宇宙创造崭新变革，或许可以与伽利略之后的巨大电磁革命相提并论——如果这些难以捉摸的波能够检测和监测得到的话。但这是一个很大的如果：我们估计，沐浴地球的引力波是如此微弱，以至于莱纳·韦斯的L形装置末端的镜子将相对于彼此来回移动不超过1/100的质子直径（意味着原子大小的1/10 000 000），即使镜子间隔几千米。测量这种微小运动是巨大的挑战。

由于史蒂芬和我的研究小组在加州理工学院合并，所以在那辉煌的一年里，我花了很多时间探索成功检测引力波的前景。在此之前，史蒂芬和他的学生盖瑞·吉本斯设计出他们自己的引力波探测器（他们从未建造过），因此他对我的研究很有助益。

史蒂芬回到剑桥后不久，在华盛顿特区莱纳的酒店房间，莱纳·韦斯和我进行了整夜激烈的讨论，我的探索得到关键的进展。我确信成功的前景非常好，我应该把自己的大部分职业生涯和未来的学生都用于这方面的研究，以帮助莱纳和其他实验者实现我们的引力波远景。而其余的，正如他们所说，已为历史所记载。

2015年9月14日，LIGO引力波探测器（由莱纳和我还有罗纳德·德雷弗共同建立的1　000人项目建造，由巴里·巴里什组织、组装和领导）记录了它们的第一次引力波。通过将波的模式与电脑模拟的预测进行比较，我们的团队得出结论，该引力波是由距离地球13亿光年的两个重的黑洞相撞而产生的。这是引力波天文学的开始。我们的团队获得的引力波成果相当于伽利略为电磁波所取得的成就。

我坚信，在接下来的几十年中，下一代引力波天文学家们将使用这些波，不仅测试史蒂芬的黑洞物理定律，而且还能检测和监测来自我们宇宙奇异诞生的引力波，从而测试史蒂芬和其他人关于我们的宇宙是如何诞生的思想。

在我们1974—1975这辉煌的一年中，当我在引力波上犹豫不决，史蒂芬领导我们合并的黑洞研究小组时，史蒂芬本人有一个比他的霍金辐射发现更为激进的洞见。他给出了一个令人信服的，近乎密不透风的证明，当黑洞形成然后通过发射辐射完全蒸发掉时，进入黑洞的信息无法再返出来。信息不可避免地丢失了。

这是激进的，因为量子物理定律明确地坚持信息永远不会完全丢失。因此，如果史蒂芬是对的，那么黑洞违反了最基本的量子力学定律。

怎么会这样？黑洞蒸发受量子力学和广义相对论的组合定律（尚不清楚的量子引力定律）的制约；因此，史蒂芬推论，相对论和量子物理学的激烈结合必然会导致信息毁灭。

绝大多数理论物理学家认为这个结论令人憎恶，他们极度怀疑。因此，44年来，他们一直在努力对抗这个所谓的信息丢失悖论。这是一场值得为之努力但痛苦的斗争，因为这个悖论是理解量子引力定律的有力钥匙。史蒂芬本人在2003年发现了一种信息可能在黑洞蒸发过程中逃脱的方式，但这并没有平息理论家的争论。史蒂芬没有证明信息逃脱，所以奋斗仍在继续。

在史蒂芬骨灰入葬西敏寺时，在我对他的悼词中，我用这些话来纪念这种奋斗："牛顿给了我们答案。霍金给了我们问题。而霍金的问题本身将继续在几十年间产生突破。当我们最终掌握量子引力定律并完全理解宇宙的诞生时，这可能主要归功于站在霍金的肩膀上。"



就像我们辉煌的1974—1975年只是我的引力波探索的开始一样，所以那也只是史蒂芬力图详细理解量子引力定律的开始，以及理解这些定律揭示黑洞信息和随机性的本质，还有我们宇宙的奇异诞生的本质，以及黑洞内奇点的本质，也就是时间的诞生和死亡的本质的开始。

这些都是大问题。非常大的问题。

我回避了大问题。我没有足够的技巧、智慧或自信来解决这些问题。相比之下，史蒂芬总是被大问题所吸引，无论它们是否深深植根于他的科学领域。他确实拥有必要的技能、智慧和自信。

这本书汇集了他对大问题的回答，也就是他在弥留之际仍在研究的问题的答案。

史蒂芬对六个问题的回答深深植根于他的科学领域（上帝存在吗？一切如何开始？我们能预测未来吗？黑洞中是什么？时间旅行可能吗？我们如何塑造未来？）。在这里，你将发现他深入讨论了我在本导言中简要描述的问题，以及更多更多的内容。

虽然他对其他四大问题的回答并没有牢固扎根在他的科学领域中（我们能在地球上存活吗？宇宙中存在其他智慧生命吗？我们应去太空殖民吗？人工智能会不会超过我们？），但是，他的回答仍然显示出一如既往的深刻智慧和创造力。

我希望你能像我一样，发现他的回答富有启发性和洞察力。希望你能欣赏！

基普·S.索恩

2018年7月



Why we must ask the big questions
我们为什么必须问大问题

人们一直想要得到大问题的答案。我们来自哪里？宇宙如何开始？它背后一切的意义和设计是什么？外太空有人吗？现在看起来，过去对创生的记叙不太相关且不太可信。它们已经被各种只能被称为迷信的东西所取代，诸如从“新纪元运动”到《星际迷航》。但真正的科学可能比科幻小说更奇特，也更令人满意。

我是一名科学家，还是一名对物理学、宇宙学、宇宙和人类未来极为着迷的科学家。父母培养我坚定的好奇心，和我父亲一样，我研究并试图回答科学向我们提出的许多问题。在我的脑海里，我一生都在宇宙中旅行。通过理论物理，我试图回答一些大问题。我曾经一度以为，自己会看到我们所知的物理学的终结，不过现在我认为，在我离开很久很久后，奇妙的发现还会持续产生。我们接近其中一些问题的答案，但我们还没有到达那里。

问题是，大多数人都认为真正的科学对他们而言太复杂、太难理解，但我认为并非如此。研究制约宇宙的基本定律需要大量的时间，而大多数人承担不起；如果所有的人都从事理论物理，世界很快就会停滞不前。但如果将其基本思想以清晰的方式，并且不用方程来呈现，大多数人是可以理解并欣赏的。我相信这是可能的，也是我喜欢并毕生努力去做的事。

这是一个进行理论物理研究的黄金时代，生逢其时，何其有幸。在过去的50年里，我们的宇宙图景发生了很大的变化。如果我对此做出了贡献，我会很高兴。太空时代的伟大启示之一是它赋予人类有关我们自身的视野。当我们从太空回望地球，我们将人类自身视为一个整体。我们看到了统一，而不是分裂。就是这样的简单图景，它传递着撼人的信息：一个星球，一个人类。

对我们全球社会面临的主要挑战，一些人要求即刻采取行动，我想发声附和他们。我希望这个事业继续前进，即使我不再在世上，有权力的人能表现出创造力、勇气和领导能力。让他们迎接可持续发展目标的

挑战，并采取行动，不是出于自身利益，而是出于共同利益。我深知时间之珍贵。抓住时机，现在就采取行动。



我之前写过关于我生平的文章。尽管如此，由于想到了自己对这些重大问题沉迷终生，我的一些早期经历仍然值得重提。

我刚好出生于伽利略去世300年后，我想这个巧合对我的科学生涯颇有影响。但是，我估计那天大约另有20万个婴儿出生；我不知道他们当中是否还有其他人后来对天文学感兴趣。

我在伦敦海格特的一栋高大狭窄的维多利亚式房子里长大。第二次世界大战期间，所有人都认为伦敦将被夷为平地，当时，我的父母以非常便宜的价格购得这所房子。有一天，一枚V　2火箭就落在离我们家只有几幢房子远的地方。当时我和母亲、妹妹都外出了，只有父亲在家，幸好他没有受伤。多年后，在我曾经和朋友霍华德一起玩的路上，还有一个大炸弹坑。我们同样用贯穿我一生的好奇心调查了爆炸的结果。

1950年，我父亲工作的地点搬到了伦敦北部边缘的米尔山新建的国立医学研究所，所以我们家搬到了教堂城圣奥尔本斯附近。我被送到女子高中。虽然名为女校，但也接受十岁以下的男孩。后来我去了圣奥尔本斯学校。我在班上的成绩从未优于半数的同学。那是一个非常优秀的班级。但我的同学给了我“爱因斯坦”的绰号，他们大概看到了我的潜质。当我十二岁时，我的一个朋友和另一个朋友用一袋糖果打赌，说我永远不会有任何作为。

在圣奥尔本斯，我有六七个亲密的朋友，我记得大家长时间地讨论和辩论，话题从无线电控制模型直至宗教。我们讨论的一个重要问题是宇宙的起源，以及是否需要上帝创造并启动它。我听说来自遥远星系的光向光谱的红端移动，这表明宇宙正在膨胀。但我确信必定有其他一些引起红移的原因。也许光线在向我们飞来的路途中累了，变得更红？一个基本上不变的和永恒的宇宙似乎更自然得多。（仅仅几年之后，在我攻读博士大约两年之后，宇宙微波背景被发现，我意识到自己过去错

了。）

我一直对事物的运行方式非常感兴趣，而且我常常把它们拆开，看看它们是如何工作的，但我不太擅长将它们重新组合起来。我的实践能力永远赶不上我的理论素质。我的父亲鼓励我对科学的兴趣，并且非常希望我能上牛津大学或剑桥大学。他本人上了牛津大学，所以他认为我也应该申请那里。当时，大学学院没有数学导师，所以我别无选择，只能尝试申请自然科学的奖学金。申请成功后连我自己都感到惊讶。

牛津当时的风气是非常厌恶用功。你应该毫不费力地表现出色，或者接受你的平庸而获得四等学位。我把这当作不用功的最好借口。我不为此感到骄傲，我只是陈述了我当时的态度，我的大多数同学都表示赞同。我生病的一个结果就是改变那一切。当你面临早逝的可能时，它会让你意识到，在你的生命结束之前，还有很多事情要做。

由于我不用功，我计划在期末考试时，避免花精力死记硬背，而是专注于理论物理问题。但考试的前一晚我没有睡觉，于是我考得不很好，成绩在第一等和第二等之间。我必须接受考官的面试才能确定我应该得到几等。在面试中他们问我未来的计划，我说我想要做研究。如果他们给我第一等，我会去剑桥，如果只得到第二等，我会留在牛津。他们给了我第一等。

在期末考试后的长假中，学院提供一些小额的旅行补助金。我以为去的地方越远获得的机会越大，所以我说我想去伊朗。1962年夏天，我出发了，乘火车到伊斯坦布尔，然后到土耳其东部的埃尔祖鲁姆，然后到大不里士、德黑兰、伊斯法罕、设拉子和古代波斯王国的首都波斯波利斯。在回家途中，我和我的旅伴理查德·秦恩，被困于布安扎赫拉地震。这是一次里氏7.1级的强烈地震，造成12 000多人的死亡。我肯定一直在震中附近，但我没有意识到地震，因为我病了，当时正在一辆颠簸的公共汽车上。

接下来，我们在大不里士度过了几天，我从严重的痢疾和肋骨骨折中恢复过来，后者是我被撞到汽车前面的座位上时受的伤。因为我们不会讲波斯语，仍然不知道那场灾难。直到到达伊斯坦布尔，我们才知道发生了什么。我给父母寄了一张明信片，他们已经焦急地等了十天，他们最后一次听到我的消息是在地震发生的当天，那时我正要离开德黑兰前往灾区。尽管发生了地震，但我对在伊朗的时光有很多美好的回忆。

对世界的强烈好奇可能会让人受到伤害，但对我而言，这可能是我生命中唯一一次因好奇而受伤。

1962年10月，我20岁，我到了剑桥的应用数学和理论物理系。我申请与当时最知名的英国天文学家弗雷德·霍伊尔合作。我称他为天文学家，因为那时宇宙学很难被认为是一个正统的领域。然而，霍伊尔已有足够的学生，所以我被分配给丹尼斯·西阿玛，这令我非常失望，我没有听说过他。不过，幸好我没有成为霍伊尔的学生，否则我必须去捍卫他的稳恒态理论，这个任务比脱欧谈判更难。我从阅读广义相对论的旧教科书开始做研究——一如既往，我被最大的问题吸引住。

正如你们可能从电影中看到的，埃迪·雷德梅恩扮演了一个特别英俊的我，在牛津大学的第三年，我注意到自己似乎越来越笨拙。我跌倒了一两次并无法知道为什么，我发现我再也不能够正常地划船，很明显身体出问题了，医生告诉我要戒掉啤酒，但我有些不满。

到剑桥的那年冬天非常寒冷。我回家过圣诞假期，妈妈说服我去奥尔本斯的湖上滑冰，尽管我知道身体很不适，不应该去，但还是去了。我跌倒了，再爬起来很困难。我的妈妈意识到出了什么问题，并带我去看医生。

我在伦敦圣巴塞洛缪医院住了几个星期，并进行了很多检查。在1962年，检查比现在更落后一些。医生从我的手臂上取下一块肌肉样品，把电极插进我的身体，把X射线不能透过的流体注入我的脊椎，他们在X射线上看液体随着病床的倾斜在脊柱里上下移动。他们实际上从未告诉我出了什么问题，但我猜想到情况一定很糟糕，所以我不想问。我从医生的谈话中琢磨出，无论这是什么病，只会变得更糟，而且他们除了给我维生素之外束手无策。事实上，给我做检查的医生放弃了对我的治疗，我再也没见到过他。

后来我还是知道了，我得了肌萎缩侧索硬化症（ALS），一种运动神经元疾病，其中大脑和脊髓的神经细胞萎缩，然后结疤或硬化。我还了解到患有这种疾病的人逐渐失去控制行动、说话、吃饭和最终呼吸的能力。

我的病情似乎发展很快。可以理解的是，我变得情绪低落，看不到继续研读博士学位的必要，因为我不知道自己能否活得足够长来完成学

位。但随后病情进展缓慢下来，我对研究又重燃热情。在我的期望降低到零之后，新的每一天都成为奖赏，我开始珍惜所拥有的一切。只要有生命，希望就存在。

当然，还有一位名叫简·王尔德的年轻女子，我在聚会上认识她。她非常坚定地认为，我们可以共同对抗我的疾病。她的信心给了我希望。订婚让我精神振奋，我意识到，如果我们要结婚，我必须得到一份工作并完成我的博士学位。一如既往，那些重大问题正在推动着我。我开始努力研究，我很享受。

为了在学习期间获得资助，我申请了龚维尔和基斯学院的研究奖学金。令我大为惊讶的是，我中选并从那以后成了基斯的研究员。获得研究金是我生活的一个转折点。这意味着我可以继续我的研究，尽管我的残疾越来越严重。这也意味着我和简可以结婚，我们于1965年7月结婚。婚后大约两年，我们的第一个孩子罗伯特出生。又大约三年后，我们的第二个孩子露西出生。1979年我们的第三个孩子蒂莫西出生。

作为父亲，我总尝试告诉孩子提问题的重要性。我儿子蒂莫西曾在一次接受采访时讲过一个故事，他小时候担心自己问的问题有点傻，他想要知道周围是否散落有许多小宇宙。我告诉他永远不要害怕想出一个主意或者一个假设，无论显得多么愚蠢（这是他的担心，不是我的）。



在20世纪60年代早期，宇宙学中的大问题是“宇宙有一个开端吗？”许多科学家都本能地反对这个思想，因为他们觉得一个创生的点会是科学崩溃之处。人们必须诉诸宗教和上帝之手，以确定宇宙将如何开始。这显然是一个基本问题，而它正是我完成博士论文所需要的。

罗杰·彭罗斯证明过，一旦垂死的恒星收缩到一定的半径，就不可避免地会出现奇点，这就是空间和时间结束之处。当然，我们已经知道没有任何东西可以阻止一颗巨大的冷星在自身引力作用下坍缩，直至达到无限密度的奇点。我意识到类似的论点可以应用于宇宙的膨胀。在这种情况下，我可以证明时空有一个开始的奇点。

1970年，我的女儿露西出生几天后，我的尤里卡时刻出现了。那天晚上要睡觉时，由于残疾，我上床过程非常缓慢，我意识到我为奇点定理发展的因果结构理论可以应用到黑洞上。如果广义相对论是正确的，并且能量密度是正的，那么黑洞的边界——事件视界的面积具有这样的性质，当额外的物质或辐射落入黑洞时，它总是增加。此外，如果两个黑洞碰撞并合并形成单个黑洞，则围绕所产生的黑洞的事件视界的面积大于围绕原始黑洞的事件视界的面积之和。

那是一个黄金时代，我们甚至在得到黑洞存在的任何观察证据之前，就解决了黑洞理论中的大部分主要问题。事实上，我们对经典广义相对论的研究获得了如此成功，1973年我和乔治·埃利斯合作出版了《时空的大尺度结构》之后，甚至感到有些无所事事。我和彭罗斯的研究工作证明了广义相对论在奇点处崩溃，所以很明显下一步是将非常大的理论（广义相对论）和非常小的理论（量子论）结合起来。我特别想知道，可以存在一个这样的原子吗，它的核是在早期宇宙中形成的一个微小的太初黑洞？

为了回答这个问题，我研究了量子场或者粒子会如何被黑洞散射。我预料入射波的部分将被吸收，而剩下的被散射。但令我大为惊讶的是，我发现似乎存在从黑洞本身来的发射。起初，我以为这一定是我计算中的一个错误，后来我觉得那是真实的，因为该发射正好是把视界面积和黑洞熵相等同所需要的。这个熵，即是该系统无序的一种度量。黑洞的熵被总结在这个简单的公式中：

$$S=\frac{Akc^3}{4G\hbar}$$

该公式按照视界面积表达熵，它包含自然的三个基本常数：

光速c、牛顿引力常数G以及普朗克常数$\hbar$。从黑洞发出的这种热辐射现在被称为霍金辐射，我为发现了它而自豪。

我的研究揭示了一个深刻的、以前未曾预料到的引力与热力学之间

的关系，并解决了一个悖论，该悖论曾被争论了30年也没有太大进展：在缩小的黑洞遗留下的辐射里怎么能携带形成它的东西的所有信息？我发现信息没有丢失，但它没有以有用的方式返回——就像燃烧百科全书后，只有烟雾和灰烬留下。

1974年，我当选为皇家学会会员。这次选举让我系的人感到惊讶，因为我年轻，只是一名初级研究助理。但在三年内，我被提升为教授。我对黑洞的研究给了我希望，我们将会发现万物的理论，而寻求该理论鞭策我继续前进。

同年，我的朋友基普·S.索恩邀请我和我的小家庭以及另外一位研究广义相对论的学者到加州理工学院。在过去的四年里，我一直在使用手动轮椅和蓝色电动三轮车，其速度和缓慢骑自行车相当，我有时用它非法携带乘客。当我们在加利福尼亚时，我们住在校园附近，那座房子为殖民时期风格，属于加州理工学院。在那里，我第一次能够享受全天候使用电动轮椅。它给了我很大的独立性，特别是在美国，建筑和人行道比在英国更方便残疾人。

1975年，我们从加州理工学院回来时，最初我情绪很低落。与在美国乐观敢闯的态度相比，在英国的一切似乎都狭隘受限。当时，随处都是因荷兰榆树病致死的树木，全国还为罢工所困扰。然而，我的研究取得了成功，并于1979年当选为卢卡斯数学教授，这是艾萨克·牛顿爵士和保罗·狄拉克曾经任职过的位置。因此，我的情绪又高昂起来。

在20世纪70年代，我一直主要从事黑洞研究，但我对宇宙学的兴趣被重新唤起。其原因是，有人设想，早期宇宙经历过一个快速暴胀的时期。宇宙尺度在此期间以不断增加的速率增长，就像自英国脱欧投票以来价格增长的方式。我还花时间与吉姆·哈特尔合作，制定了一个我们称之为“无边界”的宇宙诞生理论。

20世纪80年代初期，我的健康状况继续恶化，我忍受着长时间的窒息，因为我的咽喉功能正在减弱，并且在我吃东西的时候食物会进入我的肺部。1985年，我在瑞士的欧洲核子研究中心（CERN）之行中得了肺炎。这是一个生死攸关的时刻。我被紧急送往卢塞恩州立医院并用上呼吸机。医生向简建议，病情已经发展到束手无策的阶段，他们要关掉我的呼吸机来结束我的生命。但简拒绝了，让我乘坐紧急救护飞机飞回剑桥的爱登布鲁克医院。

可以想象这是一个多么困难的时期，多亏爱登布鲁克的医生们努力让我恢复到访问瑞士之前的状态。然而，由于食物和唾液仍能通过喉部进入我的肺部，他们不得不施行了气管切开术。正如大多数人都知道的，气管切开术会导致说话能力的丧失。人的声音非常重要，如果声音像我的那样含糊不清，人们就会认为你精神上有缺陷，并采取相应的方式对待你。在气管切开术之前，我的讲话非常模糊，只有熟识我的人才能理解我，其中包括我的孩子们。在气管切开术后的一段时间里，一个人拿着拼写卡，指出上面的字母，我通过抬起眉毛认可，通过这种方式来逐个确认字母拼出单词，那是我能沟通的唯一方法。

幸运的是，加利福尼亚的一位名叫瓦尔特·沃尔托兹的计算机专家听说了我的困难。他给我发来一个称为平衡器的电脑程序。这使我能从轮椅上的电脑屏幕的菜单中，通过按下手中的开关选择整个单词。从那时起，该系统已经得到发展。现在我使用英特尔开发的一个名为阿卡特的程序，我用眼镜里的一个小传感器，通过我的脸颊动作控制它。它有一部手机，让我访问互联网。我可以声称自己是与世界最有联系的人。然而，我保留了原先的语音合成器，原因是我没有听到比这更清晰的语音，而且我迄今仍然认同这种声音，尽管它带有美国口音。

1982年，大约是在我进行无边界研究的时候，我首次想到写一本关于宇宙的科普书。我以为，这可以提供适量的帮助支持我上学的孩子，并支付不断上涨的护理花费，但主要原因是我想解释我们对宇宙的理解已经到了何等程度：我们多么接近找到一个完整的理论，它将描述宇宙和其中的一切。作为一名科学家，不仅提问并找到答案非常重要，我认为还有义务与世界交流我们获取的新进展。

《时间简史》于1988年愚人节首次发表，真是恰逢其时。的确，这本书最初打算取名《从大爆炸到黑洞：时间短史》。书名被缩短并改为“简史”，其余的都已成为历史。

我从未想过《时间简史》能够如此成功。毫无疑问，尽管我有残疾，但我如何成为理论物理学家和畅销书作家，人们对这故事的好奇也对本书有助益。不是每个人都能读完它或理解他们阅读的所有内容，但他们至少努力思考过关于我们存在的一个大问题，并认为我们生活在一个由理性定律制约的宇宙中，通过科学，我们可以发现和理解这些定律。

对我的同事们来说，我只是一位物理学家，但对于公众，我可能是世界上最著名的科学家。部分原因是科学家除了爱因斯坦外，并不是广为人知的摇滚明星，另一部分原因是我符合残疾天才的刻板印象。我不能用假发和墨镜伪装自己——轮椅使我暴露无遗。众所周知且容易识别有其优点，也有其缺点，但优点远远超过缺点。人们似乎真的很高兴见到我。2012年，我在伦敦参加残奥会开幕式时，我甚至拥有了我有史以来最多的观众。

我在这个星球上过着一种非凡的生活，我利用奇思异想和物理定律穿越宇宙。我到过银河系最远处，旅行进入过黑洞，还返回过时间的起点。在这个地球上，我经历了高潮和低谷、动荡与安宁、成功和痛苦。我遭遇贫穷，享用富裕，曾经矫健，又身患残疾。我既受到赞扬，也受到批评，但从未被忽视过。通过我的研究，我非常荣幸地能够为人类对宇宙的理解做出贡献。但如果宇宙中不存在我所爱且爱我的人，那的确会是一个空虚的宇宙。没有他们，它的一切奇迹都对我毫无意义。

在所有这一切结束时，我们人类自身作为自然界的基本粒子的集合，已经能够理解制约我们和我们宇宙的规律，这是一个伟大的胜利。我想分享我对这些重大问题的激动以及我对此探索的热情。

有朝一日，我希望我们能够知道所有这些问题的答案。但还有其他挑战，必须回答地球上的其他重大问题，这些也需要新一代感兴趣和参与，而且他们还得对科学有所了解。我们将如何养活不断增长的人口？如何提供干净的水、产生可再生能源、防止并治愈疾病、减缓全球气候变化？我希望科学技术能够回答这些问题，但需要人，有知识和理解力的人，去实施这些解决方案。让我们为每个女人和男人奋斗，为了让他们都能过上健康、安全，并充满了机会和爱的生活。我们都是时间旅行者，让我们一起踏入未来。让我们共同努力，使这个未来成为我们想去访问的地方。

勇敢、好奇、坚定、战胜困难。我们一定能够做到。



当你还是个孩子时，你的梦想是什么，它实现了吗？

“我想成为一名伟大的科学家。然而，当我在学校时，我不是一个非常好的学生，并且难得优于班级半数的同学。我的作业不整洁，我的书写不太好。但我在学校有好朋友。我们谈论所有的话题，特别是宇宙的起源。这就是我的梦想开始的地方，我很幸运它已经成真。”

1　Is there a God？
上帝存在吗？

科学正在越来越多地回答曾经是宗教领域的问题。宗教是回答我们都问的问题的早期尝试：为什么我们在这里，我们来自何方？很久以前，答案几乎总是千篇一律：众神创造万物。世界是一个可怕的地方，所以即使像维京人一样强硬的人也相信超自然的存在，由此来理解诸如闪电、风暴、日食、月食等自然现象。如今，科学提供了更好、更一致的答案，但人们总是依附宗教，因为它给予了安慰，而他们不信任或不理解科学。

几年前，《泰晤士报》在头版刊登了一篇文章，标题是：“霍金说：上帝并未创造宇宙。”文章附有插图。上帝的形象取自米开朗琪罗的一幅画，显得拥有雷霆万钧的威力。他们印了一张我显得颇为自得的照片。他们让我们看起来像是在进行一场决斗。但我对上帝不抱怨恨。我不想给人留下这样的印象，似乎我的研究是关于证明或反驳上帝的存在。我的研究是要找到理解围绕我们四周的宇宙的合理框架。

几个世纪以来，人们认为像我一样的残疾人是生活在上帝的诅咒之下的。好吧，我想我可能使那里的某位感到不高兴，但我更愿意认为，一切都可以由自然定律给予另一种解释。如果你像我一样相信科学，你就会相信存在永远得遵守的一些定律。如果你愿意，你可以说这些定律是上帝的杰作，但那更是对上帝的定义，而非对其存在的证明。大约公元前300年，一位名叫阿利斯塔克的哲学家被日食、月食迷住了，特别是月食。他很勇敢地质疑它们是否真的是由神造成的。阿利斯塔克是一个真正的科学先驱。他小心翼翼地研究了天穹并获得一个大胆的结论：他意识到月食其实是地球的阴影越过月球，而不是一个神圣的事件。这一发现使他心灵解放，他能够弄清他的上空真正发生的事情，并绘制显示太阳、地球和月球的真实关系的图。从那里他得出了更为非凡的结论。他推断出地球不像众人以为的那样是宇宙的中心，而是围绕着太阳运行的。事实上，理解这种安排就解释了所有的日食和月食。当月球在地球上投下阴影时，就会发生日食。当地球遮挡月球时，就会发生月食。但是阿利斯塔克又更进了一步。不像他同时代的人以为的那样，他认为星星并非天穹上的缝隙漏下的一缕光，那些星星是其他的太阳，就

像我们的太阳一样，只不过离得非常远。这是多么令人惊叹的发现啊！宇宙是一个受原理或定律制约的机器。这些定律是人类头脑可以理解的。

我相信这些定律的发现是人类最大的成就，因为正是我们现在所称的这些自然定律将告诉我们究竟是否需要一位神来解释宇宙。自然定律描述了事物在过去、现在和未来的实际运行方式。在网球比赛中，球总是准确到达自然定律预告的位置。此外还有许多其他定律也在起作用。它们控制着正在发生的一切，从在运动员肌肉中如何产生射击的能量，到他们脚下的草的生长速度。但真正重要的是，这些物理定律以及定律之不可变是普适的。它们不仅适用于一个球的飞行，还适合于一个行星，以及宇宙中的其他一切的运动。与人类制定的法律不同，自然定律不能被打破。那就是为什么它们如此强大，而从宗教角度看时，也是有争议的。

如果你像我一样接受自然定律是固定的，那么很快就会接着问：上帝有什么作用？这是科学和宗教之间矛盾的重要部分，虽然我的观点作为头条新闻亮出，但这实际上是一场古老的冲突。人们可以将上帝定义为自然定律的化身。然而，这并不是大多数人心目中的上帝。他们的意思是，上帝要像人一样地存在，与之可有个人关系。当你仰望无比浩瀚的天穹，栖居宇宙中的人生是如此微不足道和偶然啊，这似乎极其难以置信。

我在非个人意义上使用“上帝”这个词，正如爱因斯坦那样，以之表述自然定律，所以知道了上帝的心灵正是了解了自然定律。我的预测是，到21世纪末，我们将会知道上帝的心灵。

现在剩下的一个领域，宗教可以有发言权的是宇宙的起源，但即使在这里，科学也正在取得进展，应该很快就能提供关于宇宙如何开始的确切答案。我出版了一本书，询问上帝是否创造了宇宙，引起了一些轰动。对科学家在宗教问题上居然说三道四，人们感到不快。我不想告诉任何人该相信什么，但对我而言，问上帝是否存在是一个有效的科学问题。毕竟，很难想象一个比什么或谁创生了并控制宇宙更重要或更基本的奥秘。

根据科学定律，我认为宇宙是自发地从无创生出来的。科学的基本假设是科学决定论。在给定某一时刻的宇宙的状态后，科学定律就确定

宇宙的演化。这些定律可由也可不由上帝颁布，但他不能干涉使之违反定律，否则它们就不算是定律。这就留给上帝选择宇宙的初始状态的自由，但即使在这里似乎也可能存在定律。所以上帝也许根本就没有自由。

不管宇宙的复杂性和多样性，制造一个宇宙其实只需要三种成分。试想象我们可以在某种宇宙食谱中列出它们。那么我们烹饪宇宙所需的三种成分是什么？首先是物质——有质量的东西。物质就在我们身边，脚下的地中和太空外面。灰尘、岩石、冰、液体。巨大的气体云、恒星的巨大螺旋，每个都包含数十亿个太阳，向外延伸到令人难以置信的距离。

你需要的第二种成分是能量。即使你从未思考过它，我们都知道能量是什么。那是我们每天都遇到的东西。仰望太阳你可以在脸上感受到它：那是9 300万英里（1英里＝1.609千米）外的一个恒星产生的能量。能量渗透宇宙，它驱动使宇宙永远充满活力，并不断变化的过程。

这样我们有了物质，我们有了能量。为了建立宇宙，我们需要的第三种成分是空间。很多空间。你可以说宇宙有很多品质——可怕、美丽、暴烈。但有一个品质和它毫不相干，那就是狭窄。无论我们朝哪里看，我们都看到空间，更多空间，更多更多的空间。空间向所有方向伸展。它足以使你头晕。那么所有的这一切，物质、能量和空间又是从何而来呢？直到20世纪我们才明白。

答案来自一个人的洞察力。此人可能是有史以来最杰出的科学家。他的名字叫阿尔伯特·爱因斯坦。遗憾的是，我从未见到他，因为他去世时我才13岁。爱因斯坦意识到某种极其非凡的东西：制造宇宙所需的两种主要成分，质量和能量，基本上是一个东西，如果你愿意的话，可以说两者是同一枚硬币的两面。他著名的等式$E=mc^2$只是意味着质量可以被认为是一种能量，反之亦然。所以我们现在可以说，宇宙并没有三种成分，它仅有两种成分：能量和空间。那么，所有这些能量和空间又是从何而来的呢？科学家经过数十年的研究后找到了答案：空间和能量是在我们现在称为大爆炸的事件中自发产生的。

在大爆炸的那一刻，整个宇宙出现，伴随着空间。这一切都胀大，就像气球被吹大一样。那么所有这些能量和空间从何而来？这充满能量的整个宇宙，这极端广袤的空间及其包容的万物，如何无中生有？

对于一些人来说，这是上帝重新进入角色之处。正是上帝创造了能量和空间。大爆炸是创生的时刻。但科学讲的是另一个故事。冒着陷入麻烦的风险，我想我们更能理解恐吓维京人的自然现象。我们甚至可以超越爱因斯坦所发现的能量和物质的美丽对称。我们可以利用自然定律来解决宇宙的起源本身，并发现是否上帝的存在是唯一的解释。

我于第二次世界大战后在英国长大，那是一个节衣缩食的时期。我们被告知你永远不会无代价地得到任何东西。但现在，经过一生的研究，我认为实际上可以免费获得整个宇宙。

宇宙大爆炸核心的巨大神秘之处在于，解释不可思议的巨大的、拥有空间和能量的整个宇宙如何能无中生有。其秘密在于我们的宇宙最奇怪的一个事实。物理定律要求存在某种叫作“负能量”的东西。

为了帮助你理解这个奇怪的但很关键的概念，让我借鉴一个简单的比喻。想象一下，一个人想在平地上建造一座小山。那座山将代表宇宙。为了造这座小山，他在地上挖了一个洞并用土来堆他的山。当然他不只是在建一座小山，他还挖了一个洞，实际上是山的一个负版本。那个洞里面的东西现在已经变成山丘，所以这一切都完美地平衡。这就是宇宙开端背后的原理。

大爆炸产生了大量的正能量，它同时也产生同样多的负能量。通过这种方式，正的和负的加起来总是为零。这是自然的另一个定律。

那么今天这些负能量在哪里呢？它在我们宇宙食谱中的第三种成分中：它在空间中。这可能听起来很奇怪，但根据引力和运动的自然定律——科学中最古老的那些定律——空间本身就是一个巨大的负能量仓库，足以确保一切加起来为零。

我得承认，除非你喜爱数学，这些很难掌握，但这是真的。数十亿个星系的无尽网络，每个星系都由引力相互拉扯，就像一个巨大的存储设备一样运行。宇宙就像一个储存负能量的巨大电池。事物的正面——我们今天看到的质量和能量——就像那座小山，相应的洞或事物的负面遍布整个太空。

那么在我们寻找是否存在上帝的过程中，这意味着什么呢？这意味着，如果宇宙叠加起来是无，那么你就不需要上帝来创造它。宇宙是彻彻底底的“免费午餐”。

既然我们知道正的和负的加起来都是零，那么我们现在需要做的就是弄清楚——或者我敢说——是谁首先触发了整个过程。是什么能够导致宇宙的自发出现？起初，这似乎是一个令人困惑的问题。毕竟，在我们的日常生活中，东西不会凭空出现。你想喝咖啡时，你做不到只用手指点击就可召唤来一杯咖啡。你必须用咖啡豆、水，也许还有一些牛奶和糖来制作它。但是进入这个咖啡杯，通过牛奶颗粒，一直到原子水平，一直到亚原子水平，你进入了一个世界，在这个世界里，可以变戏法般地从无创生出某种东西。至少在短时间可能这样。那是因为，在这个尺度上，粒子譬如质子的行为符合量子力学的自然定律。他们真的可以随机出现，持续一段时间，然后再次消失，重新出现在别的地方。

因为我们知道宇宙本身一度非常小——也许比质子还小。这意味着某种非常了不起的东西。它意味着宇宙本身，尽管令人难以置信地广阔而复杂，在不违反已知的自然定律的情况下，可以就这样突然出现。从那一刻开始，随着空间本身的膨胀，数量巨大的能量被释放出来，而空间正是一个存放平衡账簿所需的全部负能量的地方。当然再次引出一个关键问题：上帝创造了允许发生大爆炸的量子定律吗？简而言之，我们需要一位上帝预先设置以使大爆炸可以爆炸吗？我不想冒犯任何有信仰的人，但我认为科学有比神圣的造物主更令人信服的解释。

我们的日常经验让我们认为，发生的一切必须由某些发生在较早时期的事情引起，所以自然认为一定是某种事物——也许是上帝——导致了宇宙的产生。但是，当我们将宇宙作为一个整体来谈论时，就未必如此了。让我来解释一下。想象一条河沿着山边流下。那么是什么造成了河流？嗯，也许是早先在山上降下的雨。但是，那又是什么导致降雨？一个很好的答案就是太阳，它照在海洋上，将水蒸气升空，形成云层。那么是什么导致了太阳照耀？嗯，如果我们看到太阳的内部，我们就会看到称为聚变的过程，其中氢原子连接形成氦，在此过程中释放出大量的能量。到现在为止一切都挺好。但是氢从哪里来？答：大爆炸。但这里至关重要。自然本身的定律告诉我们，宇宙不仅像质子，不需任何辅助就突然涌现，宇宙还不需要任何能量，而且大爆炸由无产生是可能的，就是无。

对此进行解释的依据是回到爱因斯坦的理论，以及他对宇宙中的空间和时间如何在根本上交织在一起的见解。大爆炸瞬间发生了一件对时间非常关键的事情，时间本身开始了。

要理解这个令人费解的思想，可以考虑在太空飘浮的黑洞。一个典型的黑洞是一颗质量大到向自身坍缩了的恒星。它的质量如此大，即使光也不能逃脱它的引力，这就是为什么它几乎完全是黑的。它的引力如此强大，它不仅会弯曲光线，还会扭曲时间。要想知道这是如何进行的，想象一台时钟正被吸入进去。随着时钟越来越接近黑洞，它开始变得越来越慢。时间本身开始减速。现在想象一台进入黑洞的时钟——嗯，当然假设它可以承受极端的引力——它实际上停止了。它之所以停止，不是因为它被毁坏了，而是因为在黑洞内部时间本身并不存在。而这正是宇宙开始时发生的事情。

在过去的一百年里，在对宇宙的理解方面，我们取得了惊人的进步。现在我们知道制约所有事物的定律，除了最极端条件之外，例如宇宙的起源或黑洞。我相信，时间在宇宙开始时所扮演的角色是消除对大设计师的需求，时间是揭示宇宙如何创生自己的最终关键。

当我们在时间中回到宇宙大爆炸的那一刻，宇宙变得越来越小，直到它最终达到这样的程度，即整个宇宙是一个如此小的空间，它实际上是一个无限小的、无穷密集的黑洞。就像在太空中飘浮的现代黑洞一样，自然规律确定了一些非常特别的东西。它们告诉我们，在这里时间本身也必然停止。因为在大爆炸之前没有时间，所以你不可能到达大爆炸之前的时刻。我们终于找到了一个没有原因的东西，因为没有时间让一个原因存在其中。对我而言，这意味着没有造物主的可能性，因为没有时间让造物主存在其中。

人们想要得到大问题，比如为什么我们在这儿的答案。他们估计答案不会简单，所以他们准备好要努力理解。当人们问是否是一位上帝创造了宇宙，我告诉他们那个问题本身毫无意义。大爆炸之前不存在时间，所以没有时间让上帝在其中创造宇宙。它就像询问到地球边缘的方向一样——地球表面是一个没有边缘的球面，所以寻找其边缘是徒劳的。

我有信仰吗？我们每个人都可以自由地相信我们想要相信的，而我认为最简单的解释是不存在上帝。没有谁创造宇宙，也没有谁指引我们的命运。这让我彻底醒悟：可能没有天堂也没有来世。我认为相信来世只是痴心妄想。它没有可靠的证据，它和我们在科学中所知道的一切相悖。我认为当我们死的时候，我们会回到尘埃。不过在某种意义上我们还继续活着，在我们的影响中，在我们传给了孩子的基因中。我们拥有

这一生，得以欣赏宇宙的宏伟设计，为此我极度感恩。



上帝的存在和你对宇宙开端和终结的理解如何相协调？如果上帝存在并且你有机会见到他，你会问他什么？

“问题该是，‘宇宙开始的方式是由上帝出于我们不理解的原因选择的，还是由科学定律决定的？’我相信第二个。如果你愿意，你可以将科学定律称为‘上帝’，但它不会是你会遇到的并向他提问题的人格化的上帝。不过，如果存在这样的一位上帝，我想问他对任何像在11维中的M理论那样复杂的东西如何作想。”

2 How did it all begin？
一切如何开始？

哈姆雷特说：“我可以被束缚在果壳之中，但把自己视为无限空间之王。”我认为他的意思是说，虽然我们人类在身体上非常受限，特别是我这样的情况，但我们的思想可以自由探索整个宇宙，并勇敢地去甚至连《星际迷航》都不敢造访之处。宇宙真的是无限的，还是仅仅非常大？它有一个开端吗？它会持续无限的时间，还是很长一段时间？我们有限的思想何以理解无限的宇宙？哪怕我们仅仅试图理解，这难道不是自命不凡吗？

普罗米修斯从古代神祇那里偷来了给人类使用的火，遭到了宙斯的惩罚——我宁愿冒险重蹈他的覆辙，也要说，我相信人类可以也应当去理解宇宙。普罗米修斯遭到的惩罚是被永久地拴在岩石上，但最终他被赫拉克勒斯快乐地解放了。我们在理解宇宙方面进展显著。我们还没有一个完整的图景。我愿意相信，我们可能离它已经不远了。

据中非的波桑戈人说，在太初只有黑暗、水和伟大的本巴神。有一天，本巴胃痛不堪，呕吐出太阳。太阳晒干了一些水，留下土地。本巴仍陷在痛苦中，他呕吐月亮、星星，然后是一些动物——豹子、鳄鱼、乌龟，最后是男人。

像许多其他民族一样，这些创世神话试图回答我们都要问的问题。我们为什么在这里？我们来自何处？通常给出的答案是，人类起源是比较近世的事，因为人类还一直在改善其知识和技术，这应是显而易见的。所以它不可能已经存在了很长时间，否则它本应取得更大的进展。例如，根据厄谢尔主教的说法，《创世记》把时间的开端设在公元前4004年10月22日的下午6点。另一方面，物质环境，诸如山岳河流，在人的一生中变化甚小。因此它们被认为是一个不变的背景，要么作为一个空洞的景观亘古存在，要么与人类同时被创造出来。

然而，并不是每个人都对宇宙有一个开端这个思想感到满意。例如，亚里士多德，这位最著名的希腊哲学家，相信宇宙永远存在。永恒的东西比创生的东西更完美。他认为，我们能看到文明进展的原因是洪

水或其他自然灾害一再使文明返回开始。人们愿意相信宇宙是永恒的，这是因为人们渴望不必援引神力来创造宇宙并使之运行。相反，那些相信宇宙有一个开端的人用它来证明上帝作为宇宙的第一个原因或第一推动者的存在。

如果有人相信宇宙有一个开端，那么显而易见的问题是，“在开端之前发生了什么？在创造世界之前，上帝在做什么？他是否为提出这些问题的人准备了地狱？”宇宙是否有一个开端的问题是德国哲学家伊曼纽尔·康德极为关注的问题。无论有无开端，他觉得都存在逻辑上的矛盾或二律背反。如果宇宙有一个开端，那为什么它在开端之前需等待无限的时间？他称之为正题。另一方面，如果宇宙已经存在了无限久，那为什么到达现阶段需要无限的时间？他称之为反题。正题和反题都依赖于康德的假设，也是几乎所有其他人都认为的，时间是绝对的。也就是说，它从无限的过去走向无限的未来，独立于任何可能或不可能存在的宇宙。

这仍然是当今许多科学家心目中的图景。然而，1915年，爱因斯坦引入了他革命性的广义相对论。其中，空间和时间不再是绝对的，不再是事件的固定的背景。相反，它们是动力学的，是由宇宙中物质和能量塑造的量。它们只在宇宙中才被定义，所以谈论宇宙开端之前的时间是没有意义的。这就像询问南极以南的一点，它是没有定义的。

虽然爱因斯坦的理论统一了时间和空间，但它没有告诉我们太多关于空间本身的信息。有关空间的一些东西似乎是显而易见的，即它一直在不停地延伸出去。我们预料宇宙不会在一堵砖墙处结束，虽然没有逻辑的理由说它为什么不能。不过现代仪器如哈勃太空望远镜让我们深入探究太空。我们看到的是数万亿个各种形状和尺度的星系。存在巨大的椭圆星系和像我们银河系一样的螺旋星系。每个星系都包含数千亿颗恒星，其中许多会有行星围绕。我们自己的星系在某些方向阻挡了我们的视线，但除此之外，星系在整个太空大致分布均匀，有些局部浓密，还有一些空洞。星系的密度似乎在很远的距离下降，但那似乎是因为它们离我们过远，过于黯淡，我们看不见。我们可以说的是，宇宙永远在太空中延伸出去，无论它延伸多远，都是几乎一样的。

尽管宇宙中处处似乎都一样，但它在时间上肯定在改变。这一点直到20世纪初才被人们意识到。此前，人们认为宇宙在时间上是基本不变的。它可能已经存在了无限的时间，但这似乎导致荒谬的结论。如果恒星在无限时间内辐射，它们应使宇宙加热至恒星自己的温度。那么即使

在夜晚，整个天空都会像太阳一样明亮，因为每一道视线都会终止于一颗恒星或一团尘埃。这些尘埃应已被加热到像恒星一样热。所以我们所有人观察到的现象，即夜晚的天空是黑暗的，是非常重要的。这意味着，宇宙不可能以我们今天看到的状态存在了无限久。过去肯定发生过一些事件，让恒星在有限的时间前点亮，那么来自遥远恒星的光线还来不及到达我们。这可以解释为什么夜空不是所有方向都发光。

如果恒星以前永远就在那里，那它们为什么在几十亿年前突然亮起来？什么东西充当时钟告诉它们闪耀的时刻到了？这使那些相信宇宙永远存在的哲学家们深感困惑，如伊曼纽尔·康德。但对于大多数人而言，这和宇宙就以现在差不多的样子，仅在几千年前被创造出来的思想相一致，正如厄谢尔主教所得的结论。然而，随着20世纪20年代我们在威尔逊山上用百英寸的望远镜观测宇宙，不同的思想出现了。首先，埃德温·哈勃发现了许多被称为星云的微弱的光斑。它们实际上是其他星系，那是庞大的恒星集合。这些恒星就像我们的太阳一样，但距离很远。它们之所以显得如此微小而黯淡，距离必定大到来自它们的光要花数百万年甚至数十亿年才能到达我们。这表明了宇宙的开端绝不会在区区几千年前。

但哈勃发现的第二件事更加惊人。通过分析来自其他星系的光，哈勃能够衡量它们是否正在趋近或离开我们。令他惊讶的是，他发现它们几乎都在离开。此外，它们离我们越远，就离开得越快。换句话说，宇宙正在膨胀，星系正相互离开。

宇宙膨胀的发现是20世纪伟大的智力革命之一。这个发现完全出乎意料，它彻底改变了关于宇宙起源的讨论。如果这些星系正在分离，那么它们在过去必定相互靠得更近。从目前的膨胀速度来看，我们可以估计，大约在100亿年到150亿年前，它们确实一度非常接近。因此，似乎宇宙那时就开始了，此刻万物都处在空间中的同一点。

但是许多科学家对宇宙有一个开端不满，因为它似乎意味着物理学崩溃了。人们将不得不求助于一个外部机制，为方便起见，可以称之为上帝，来决定宇宙如何开始。因此，他们推出了宇宙当前正在膨胀，但没有开端的理论。其中之一是由赫曼·邦迪、托马斯·戈尔德和弗雷德·霍伊尔于1948年提出的稳恒态理论。

稳恒态理论的思想是，随着星系分离，新星系将由设想的在整个太

空中不断产生的物质形成。宇宙已经存在了无限久，并且在任何时候都显得是一样的。最后一个属性具有明确预言的突出优点，它可以通过观察被检验。20世纪60年代早期，剑桥射电天文学组在马丁·赖尔的领导下，对微弱的射电波源进行了一次调查。这些源相当均匀地分布在天空，表明大部分源都位于我们的银河系的外面。平均来说，越弱的源离我们越远。

稳恒态理论预测了源的数量和它们的强度之间的一种关系。但观察显示存在比预测更多的微弱的源，这表明源的密度在过去较高。这与稳恒态理论的基本假设相冲突，该假设说，所有一切都不随时间而改变。出于这个以及其他原因，稳恒态理论被抛弃了。

避免宇宙具有开端的另一种尝试认为，早先存在过一个收缩的相，不过因为旋转和局部无规性，物质不会全部都落到同一点上。相反，物质的不同部分会彼此错过，宇宙将再次膨胀，而密度始终保持有限。两个俄罗斯人，叶夫根尼·栗弗席兹和伊萨克·哈拉特尼科夫声称，他们已经证明了不具准确对称性的一般收缩总会导致反弹，而密度保持有限。这个结果对于辩证唯物论非常方便，因为它避免了关于宇宙创生的尴尬问题。因此，对于苏联科学家，它成了一篇信仰的文章。

大约就在栗弗席兹和哈拉特尼科夫发表他们的结论，即宇宙没有开端的时候，我开始进行宇宙学研究。我意识到这是一个非常重要的问题，但我并不相信栗弗席兹和哈拉特尼科夫使用的论证。

我们习惯于这样的思想，事件由较早期事件引起，而较早期事件又由更早期事件引起。存在一系列的因果关系，可以一直追溯到过去。但假设这个链有一个开头，即假设存在第一个事件，那它是由什么引起的？这不是许多科学家想要解决的问题。他们要么像俄罗斯人和稳恒态理论家那样，声称宇宙没有开端，要么认为宇宙的起源不属于科学领域而属于形而上学或宗教，由此试图避免它。在我看来，这不是任何真正的科学家应该采取的立场。如果科学定律在宇宙开始时暂时失效，那么它们不也可能在其他时候失效吗？如果定律只是有时有效，则定律不成其为定律。我相信我们应该在科学的基础上尝试理解宇宙的起源。这可能是超出我们能力的任务，但至少我们应该进行尝试。

罗杰·彭罗斯和我设法证明了几何定理，表明如果爱因斯坦的广义相对论是正确的，并且某些合理的条件得到满足，那么宇宙就必定有过一

个开端。人们很难辩赢数学定理，所以栗弗席兹和哈拉特尼科夫最终承认宇宙应该有一个开端。虽然宇宙有开端的思想可能不怎么受苏联人欢迎，不过他们绝不允许意识形态阻碍物理学中的科学。由于核弹需要物理学，而它是否成功很重要。然而，苏联的意识形态否认遗传学的真理，确实阻碍了生物学的进步。

虽然罗杰·彭罗斯和我证明的定理表明宇宙必定有过一个开端，但它们没有提供有关那个开端性质的多少信息。它们指出宇宙开始于一次大爆炸，这时整个宇宙和其中万物都被皱缩成无限密度的单一的点，一个时空奇点。爱因斯坦的广义相对论在这一点崩溃了。因此，它不能用来预测宇宙以何种方式开始。遗留下的宇宙起源的问题显然超出了科学范围。

1965年10月，在我得到第一个奇点结果的几个月后，人们获得了宇宙有一个非常致密的开端的观察证据，那是在整个太空发现了微弱的微波背景。这些微波与你的微波炉中的相同，但功率却低得多。它们只会把你的比萨加热到零下270.4摄氏度，对于解冻比萨没什么用，更不用说烹饪了。你实际上可以亲自观察到这些微波。那些记得模拟信号电视的人几乎肯定看过这些微波。如果你曾经把电视机调到一个空的频道，你在屏幕上看到的雪花的百分之几就是由这个微波背景引起的。对这个背景唯一合理的解释是，它是由早期非常热和密集的状态遗留下的辐射。随着宇宙膨胀，辐射会冷却，直到它变成我们今天观察到的微弱残余。

我和其他许多人都不喜欢宇宙始于一个奇点的思想。爱因斯坦广义相对论在大爆炸附近崩溃的原因在于它是所谓的经典理论。也就是说，它隐含地假设从常识中看似显而易见的事，即每个粒子都具有明确定义的位置和明确定义的速度。在这种所谓的经典理论中，如果知道宇宙中所有粒子在某时刻的位置和速度，就可以计算出它们在过去或将来的任何其他时刻的值。然而，在20世纪初，科学家们发现，他们无法准确计算出在非常短的距离会发生什么。这不仅仅是他们需要更好的理论。在自然中似乎存在一定程度的随机性或者不确定性，无论我们的理论有多好，都无法将它们移除。它可以被概括为德国科学家沃纳·海森伯在1927年提出的不确定性原理。人们不能准确地同时预测一个粒子的位置和速度。你把位置预测得越准确，你能预测的速度就越不准确，反之亦然。

爱因斯坦强烈反对宇宙由偶然性制约的思想。他的感受可用他的一

句名言来概括："上帝不掷骰子。"但是所有证据都表明，上帝是位地地道道的赌徒。宇宙就像一个巨大的赌场，随时都有骰子不停被投掷，赌轮盘不停旋转。赌场老板在每次骰子被掷或赌轮盘旋转时，都有赔钱的风险。但是赌了大量次数，各种输赢就被平均了，而赌场老板确保它们的平均对自己有利。那就是为什么赌场老板这么富有。你赢他们的唯一机会是把你所有的钱赌上几把，无论是掷骰子或转赌轮盘。

宇宙也是一样。当宇宙很大时，存在巨量掷骰子行为，结果平均到人们可以预测的程度。但是当宇宙非常小，在宇宙大爆炸附近，只有少量掷骰子行为，而不确定性原理就非常重要。因此，为了理解宇宙的起源，人们必须将不确定性原理并入爱因斯坦的广义相对论。至少在过去的30年里，这一直是理论物理学的巨大挑战。我们尚未解决它，但取得了很多进展。

现在假设我们试图预测未来。因为我们只知道粒子的位置和速度的某种组合，所以我们无法对粒子的未来位置和速度做出精确的预测。我们只能为特定的位置和速度组合赋以概率。因此宇宙的特定未来有一定的可能性。但现在假设我们试图以同样的方式理解过去。

鉴于我们现在可以做出的观察的性质，我们所能做的全部就是将概率赋予宇宙的特定历史。因此，宇宙必然拥有许多可能的历史，每个历史都有自己的概率。存在一个宇宙的历史，英格兰再次赢得世界杯，尽管概率很低。宇宙有多个历史的观点听起来可能像科幻小说，但它现在已被接受为科学事实。这要归功于理查德·费曼，他曾在极具声望的加州理工学院工作，并在附近的脱衣舞酒吧打邦戈鼓。费曼理解事物如何运行的方式是，给每个可能的历史分配特定的概率，然后使用这个思想做出预测。它预测未来的效果非常好。因此我们认为它也可以倒推过去。

科学家们正在努力将爱因斯坦的广义相对论与费曼的多重历史的思想结合成为一个完整的统一理论，它将描述宇宙中发生的一切。这个统一理论将使我们能够计算出宇宙会如何演化，只要我们知道它在某时刻的状态。但统一理论本身并没告诉我们宇宙是如何开始的，或者它的初始状态是什么。为此，我们需要额外的东西。我们所需要的被称为边界条件，它告诉我们在宇宙的边界，即空间和时间的边缘发生了什么。不过如果宇宙的边界只是处于空间和时间的正常点的话，我们可以越过它并宣称超越的领域还是宇宙的一部分。另一方面，如果宇宙的边界是锯齿状的边缘，那里的空间或时间被压缩，而且密度为无限，那么要定义

有意义的边界条件就非常困难。所以尚不清楚需要什么样的边界条件。似乎没有逻辑基础排斥一族边界条件，而选择另外一族。

然而，加州大学圣巴巴拉分校的吉姆·哈特尔和我意识到第三种可能性。也许宇宙在空间和时间上没有边界。乍一看，这似乎与我前面提到的几何定理直接矛盾。这些定理表明宇宙必须有一个开始，一个时间边界。然而，为了使费曼技巧在数学上得到很好的定义，数学家们发展了一个叫作虚时间的概念。它与我们所经验的实时间无关。这是一个使计算成立的数学技巧，它取代了我们经验的实时间。我们的思想是说，在虚时间里没有边界。这就使试图发明边界条件没有必要。我们把这个思想称为无边界设想。

如果宇宙的边界条件是它在虚时间中没有边界，那么它不止存在一个历史。在虚时间里存在许多历史，其中每个都将确定在实时间中的历史。因此，我们拥有极丰富的宇宙历史。是什么从宇宙所有可能的历史中挑选出我们生活其中的特定历史或一组历史呢？

我们很快注意到的一点是，这些可能的宇宙历史中很多不能经历形成星系和恒星的次序，后者对我们自身的发展至关重要。也许智慧生命会在没有星系和恒星的情况下进化，但那似乎不太可能。这样，我们作为能诘问“为什么宇宙是这样的？”的生命存在这一确凿事实本身就是对我们生活其中的历史的限制。这意味着它是少数拥有星系和恒星的历史之一。这是所谓“人存原理”的一个例子。人存原理说，宇宙必须或多或少是我们看到的样子，因为如果它是不同的，那么就没有任何人在这里观察它。

许多科学家不喜欢人存原理，因为它似乎只比虚晃一招稍好，而不具有很强的预言能力。但是人存原理可以给出一个精确的表述，它在处理宇宙起源时似乎必不可少。M理论是我们完备的统一理论的最好候选者，它允许非常大量的可能的宇宙历史。大多数这些历史非常不适合智慧生命的发展。要么它们是空的，要么是过于短命的，要么是过于高度弯曲的，或在其他方面出错。然而，根据理查德·费曼的多重历史思想，这些无人居住的历史可能有相当高的概率。

我们并不关心存在多少不包含智慧生命的历史。我们只对智慧生命在其中发展的历史子集感兴趣。这种智慧生命不必像人类一样。小绿人也行。事实上，他们可能做得更好。人类智慧行为的记录不很光彩。

作为人存原理威力的一个例子，让我们考虑空间方向的数量。我们生活在三维空间中是一个常识。也就是说，我们可以用三个数字来表示空间中一个点的位置。例如，纬度、经度和海拔。但为什么空间是三维的？为什么它不是两维、四维，或其他一些维数，如科幻小说中那样？事实上，在M理论中，空间有十个维度（这理论也具有一维时间），但人们认为，十维空间方向中的七维被卷曲得非常小，留下三维大而近似平坦的方向。它就像一根吸管。吸管的表面是二维的。然而，一个方向被卷曲成一个小圆圈，因此隔开距离看，吸管就像一根一维的线。

为什么我们不生活在一个历史中，其中八个维度被蜷缩得很小，只留下我们注意到的两维？原因是，两维动物将难以消化食物。如果它像我们一样，有一个直通的肠道，它就会将那只动物分裂成两部分。这个可怜的生物就被分解了。因此，对于任何像智慧生物这样复杂的事物，两个平坦的方向是不够的。三个空间维度有一些特殊之处。在三维空间中，行星可以在恒星周围具有稳定的轨道。这是服从由罗伯特·胡克在1665年发现并由艾萨克·牛顿详细阐述的引力服从平方反比定律的结果。考虑两个物体在特定距离处的引力，如果该距离加倍，则它们之间的力减到四分之一。如果距离增加3倍，则将力除以9，如果是4倍，则将力除以16，依此类推。这导致了稳定的行星轨道。现在让我们考虑四个空间维度。万有引力就会遵循立方反比律。如果两个物体之间的距离加倍，那么引力将被除以8，3倍则除以27，如果是4倍，则除以64。这种立方反比律的改变使行星在它们的恒星周围不可能拥有稳定的轨道。它们要么落入它们的恒星，要么逃逸到外面的黑暗和寒冷中去。同样，原子中的电子轨道也不稳定，这样我们所知道的物质就不会存在。因此，虽然多重历史的思想允许任何数目的几乎平坦的方向，但只有拥有三个平坦方向的历史将包含智慧生命。只有在这样的历史中这个问题才会被提出：“为什么空间具有三个维度？”

我们在阿诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊发现的微波背景中观察到宇宙的一个显著特征。它本质上是宇宙在非常年轻时的场景的一种化石记录。这个背景几乎是相同的，不管我们往哪个方向看。不同方向之间的差异约为十万分之一。这些差异不可思议的小，而需要给予解释。对这种光滑性的普遍被接受的解释是，在宇宙历史的极早期，它经历过一个急剧膨胀的时期，宇宙膨胀了至少一千亿亿亿倍。这个过程被称为暴胀。与过于经常折磨我们的通货膨胀形成对比，暴胀对于宇宙是个好东西。如果这就是它的全部故事，那么微波辐射在四面八方都会是完全一

样的。那么这微小的差异来自何处？

1982年初，我写了一篇论文，提出这些差异源自于暴胀时期的量子涨落。发生量子涨落是不确定性原理的结果。此外，这些波动是形成宇宙中的星系、恒星和我们的种子。这个思想基本上和我在十年前预言的从黑洞视界来的霍金辐射机制一样，除了现在它来自于宇宙视界。宇宙视界是把宇宙中我们能看到的部分和我们看不到的部分分开的面。那年夏天，我们在剑桥举办了一个研讨会，该领域的所有主要专家都参加了。在这次会议上，我们建立了现有的关于暴胀的大部分图景，包括引起星系形成以及由此我们存在的最重要的密度涨落。有几个人为最终答案做出了贡献。这是在1993年COBE卫星发现宇宙微波背景涨落之前的十年，由此可见理论遥遥领先于实验。

再过十年后的2003年，宇宙学成为精密科学，WMAP卫星得到最初的结果。WMAP制作了一幅关于宇宙微波背景天穹温度的精彩天图，是宇宙在大约当前年龄的万分之一时的快照。你看到的无规性是被暴胀预言过的，它们意味着宇宙的某些区域的密度略高于其他区域。额外密度的引力吸引减缓了该区域的膨胀，并最终导致它坍缩形成星系和恒星。所以仔细看看微波天穹图，它是宇宙中所有结构的蓝图。我们是极早期宇宙中量子涨落的产物。上帝确实是在掷骰子。

今天我们拥有普朗克卫星，它超越了WMAP，能获得具有高得多的分辨率的宇宙天图。普朗克正在认真测试我们的理论，甚至可能检测由暴胀预言的引力波的印记。这将是量子引力在整个天穹画出的印记。

有可能存在其他宇宙。M理论预言，从无到有创生了许多宇宙，它们对应于许多不同的可能历史。随着其年龄增长到现在直至未来，每个宇宙都有许多可能的历史及许多可能的状态。这些状态的大多数都非常不同于我们观察到的这个宇宙。

我们仍然希望在日内瓦CERN的大型强子对撞机，即LHC粒子加速器上看到验证M理论的第一个证据。从M理论的角度，它只探测低能量，但是我们可能有运气看到基本理论的一个较弱的信号，诸如超对称。我认为，发现已知粒子的超对称伙伴会彻底变革我们对宇宙的理解。

2012年，日内瓦CERN的LHC宣布发现希格斯粒子。这是21世纪首

次发现的一个新的基本粒子。LHC还有一些希望发现超对称性。但即使是LHC没有发现任何新的基本粒子，在目前正在计划的下一代加速器中仍可能发现超对称性。

宇宙本身在热大爆炸中的开端是测试M理论，以及时空和物质构件的思想的终极高能实验室。不同的理论在当前的宇宙结构中留下了不同的指纹，因此天体物理数据可以为我们提供统一所有自然力的线索。所以也很可能还存在其他宇宙，但不幸的是我们永远无法探索它们。

我们已经看到了宇宙起源的一些东西，但这留下了两个大问题：宇宙会结束吗？宇宙是独一无二的吗？

那么宇宙中最可能的历史将会有什么样的未来行为？似乎存在各式各样与智慧生命的出现相容的可能性。它们取决于宇宙中的物质数量。如果超过一定的临界量，星系之间的引力将减缓膨胀。

最终他们将开始相互吸引，并将在一次大挤压中聚集在一起。这将是宇宙历史在实时间中的终结。当我在远东时，我被要求不要提到大挤压，因为它可能会动摇市场信心。但市场还是崩溃了，也许这故事不知怎么搞的还是被泄露出去。在英国，人们似乎不太担心20亿年后可能的末日。在那之前，你仍然可以大吃大喝，并寻欢作乐。

如果宇宙的密度低于临界值，则引力太弱，不足以阻止星系永远飞离。所有的恒星都会燃尽，而且宇宙将变得越来越虚空，越来越寒冷。所以，万物又要终结，不过是以一种不太戏剧化的方式终结而已，我们仍然还有几十亿年的时间可过。

在这个回答中，我试图解释一些有关我们宇宙的起源、未来和本性的事情。过去的宇宙是小而密集的，所以它就很像我开始说的果壳那样。然而这个果壳编码了在实时间里发生的一切。所以哈姆雷特是完全正确的。我们可以被束缚在果壳之中，但把我们自己视为无限空间之王。



大爆炸之前发生了什么？

“根据无边界设想，询问大爆炸之前发生什么毫无意义——就像问南极之南是什么一样——因为没有时间概念可供参照。时间的概念只存在于我们的宇宙中。”

3 Is there other intelligentlife in the universe？
宇宙中存在其他智慧生命吗？

我想稍微推测一下宇宙中生命的发展，特别是智慧生命的发展。我将把人类也包括在此，尽管人类在整个历史中的很多行为都是相当愚蠢的，并未顾及其他物种的存活。我将要讨论的两个问题是，“宇宙中其他地方存在生命的概率是多少？”“生命在未来可能会如何发展？”

随着时间的推移，事情变得更加混乱和混沌，这是大家共同的经验。这种观测甚至有其自己的定律，即所谓的热力学第二定律。这个定律是说，宇宙中的无序或熵的总量总是随着时间的推移而增加。不过，定律仅指无序总量。一个物体的秩序可以增加，只要其周围的无序量增加得更多即可。

这就是在生物中发生的事情。我们可以将生命定义为一个有序的系统，该系统可以维持其对抗无序的倾向，并能复制自身。也就是说，它可以造出类似但独立的有序系统。要完成这些，系统必须把某种有序形式的能量，例如食物、阳光或电力转变成热的形式的无序的能量。以这种方式，系统就可以在满足总的无序量增加的要求的同时，它自身和它的后代有序量增加。这听起来就像住在房子里的父母每添一个新生儿，他们的住房就变得越来越混乱。

像你我这样的生命通常有两个要素：一组告诉系统如何继续进展和如何复制自己的指令，一种执行这些指令的机制。在生物学中，这两部分被称为基因和新陈代谢。但值得强调的是，它们根本不必和生物有关。例如，电脑病毒就是一个程序，它会在电脑记忆体中复制自己，并将自己转移到其他的电脑里。因此，它符合我所给出的生命系统的定义。像生物病毒一样，它是一种相当退化的形式，因为它只包含指令或基因，并没有任何自身的新陈代谢。相反，它为主电脑或细胞的代谢重新编程。有些人质疑病毒是否应该算作生命，因为它们是寄生虫，不能独立于寄主而存在。但是，包括我们自己在内的大多数生命形式都是寄生虫，因为他们食用并依赖其他生命形式而存活。我认为电脑病毒应该算作生命。也许这揭示了人性的某些阴暗，到目前为止，我们创造的唯

一生命形式纯粹是破坏性的。你瞧，这就是按照我们自己的形象创造的生命。稍后我将回到电子生命形式。

我们通常认为的“生命”是基于碳原子链，还有一些其他原子，如氮或磷。人们可以推测，可能存在一些基于其他化学主要成分的生命，例如硅，但碳似乎是最有利的情况，因为它的化学最丰富多彩。碳原子得以存在并具有它的那些特性，需要对物理常数进行微调才可能，例如QCD标度、电荷甚至空间维数。如果这些常数具有显著不同的值，要么碳原子的核不稳定，要么电子将坍缩到核上去。乍一看，宇宙如此精细的调准似乎非同寻常。也许这就是宇宙被专门设计来产生人类的证据。然而，由于人存原理，即我们关于宇宙的理论必须与我们自身的存在相协调的思想，对于这种论证，我们必须小心。这是基于不言而喻的真理，要是宇宙不适合生命的话，我们就不会在问为什么它这么精细地调准。人们可以使用强或弱版本的人存原理。对于强人存原理，人们认为存在许多不同的宇宙，每个宇宙物理常数都有不同的值。其中少数宇宙，物理常数的值会允许像碳原子这样的东西存在，它可以作为生命系统的基石。既然我们必须生活在其中的一个宇宙中，我们就不应对物理常数被精细地调准感到惊讶。如果它们没被调准，我们就不会在这里。而对于所有那些其他宇宙，人们可以赋予什么样的操作意义？因此强人存原理并不令人十分满意。而且如果它们与我们自己的宇宙是分开的，发生在它们中的事情怎么可能影响我们的宇宙？相反的，我会采用所谓弱人存原理。也就是说，我将采用给定的物理常数的值。不过我会看到，从处于宇宙历史的现阶段在这颗行星上存在生命的事实可以得出什么结论。

宇宙在大约138亿年前的大爆炸启始时，不存在碳。因为太热了，所有的物质都处于被称为质子和中子的粒子的形式。最初会存在相同数量的质子和中子。然而，随着宇宙的膨胀，它冷却下来了。大爆炸后大约1分钟，温度会下降到大约10亿度，大约是太阳温度的100倍。在这个温度下，中子开始衰变成更多的质子。

如果这就是发生过的一切，那么宇宙中的所有物质最终都会成为最简单的元素氢，其核由一个质子组成。然而，一些中子与质子碰撞并粘在一起，形成下一个最简单的元素氦，其核由两个质子和两个中子组成。但是在早期宇宙中不会形成更重的元素，如碳或氧。很难想象可以只用氢和氦建立一个生命系统。无论如何，早期的宇宙仍然实在太热，

原子无法结合成分子。

宇宙继续膨胀和冷却。但是有些区域的密度略高于其他区域，这些区域的多余物质的引力减缓并最终阻止了膨胀。在大爆炸后大约20亿年后开始，这些区域反而坍缩形成了星系和恒星。一些早期的恒星质量会比我们的太阳更大，会比太阳更热，并把最初的氢和氦燃烧成为较重的元素，如碳、氧和铁。这可能只需几亿年。此后，一些恒星作为超新星爆炸，把重元素散落回太空，变成后代恒星的原料。

其他恒星离我们太远，我们无法直接看到是否有行星围绕其运行。然而，有两种技术可以让我们发现围绕其他恒星的行星。第一种是观测恒星，看来自它的光量是否恒定。如果一颗行星在恒星前面运动，那么来自恒星的光线会被略微遮盖。恒星会变得稍微有点暗淡。如果这种情况有规律地发生，那就是因为行星轨道将行星反复地带到恒星前面。第二种方法是准确测量恒星的位置。如果一颗行星围绕着其运行，它就会导致恒星的位置产生微小的摆动，这可以被观察到。如果是有规则的摆动，我们就可以推断这是行星围绕恒星运行引起的。从大约20年前人们开始应用这些方法，到现在已发现了几千个围绕着遥远的恒星运行的行星。据估计，每5颗恒星中就有1颗类似地球的行星围绕着它公转，而且它离恒星的距离可以让我们所知的生命存活。我们自己的太阳系是由被早期恒星残骸沾染过的气体形成的，形成于大约45亿年前，或大爆炸后90余亿年的时候。地球主要由比较重的元素构成，包括碳和氧。不知何故，其中有些原子排列成了DNA分子的形式。这就是著名的双螺旋形式，是弗朗西斯·克里克和詹姆斯·沃森于20世纪50年代在位于剑桥新博物馆遗址的一间小屋里发现的。核酸的碱基对把螺旋的两条链连在一起。核酸有四种，其碱基分别是腺嘌呤、胞嘧啶、鸟嘌呤和胸腺嘧啶。一条链上的腺嘌呤总是与另一条链上的胸腺嘧啶配对，而鸟嘌呤则与胞嘧啶配对。因此，一条链上的核酸序列就决定了另一条链上的序列是独特并与之互补的。这两条链可以分开，每条链充当模板以合成新的互补链。DNA分子因此得以复制其核酸序列中编码的遗传信息。序列的某些片断也可以用于制造蛋白质或其他化学分子；这些分子能够执行编码在序列中的指令，并组织原料供DNA以自我复制。

如前所述，我们并不知道DNA分子最早是如何产生的。因为DNA分子由随机起伏而产生的机会非常小，有的人认为生命是从其他地方来到地球的，例如，在行星仍然不稳定的时候，被脱离火星的石块带到这里

来；而且银河系中有生命的种子四处飘浮。然而，DNA似乎不太可能在太空辐射中长时间存活。

既然生命很难在任何星球上出现，我们会假设它需要很长时间形成。更准确地说，我们会假设生命姗姗来迟，但会在太阳膨胀起来并吞没地球之前，给它留出足够的时间，以进化到类似我们一样的智能生物。可能发生这种情况的时间窗口是太阳的生命周期：大约100亿年。可以想象，在此期间，某种智慧生命形式已能掌握太空飞行技术，并能逃到另一颗恒星去。如果无路可逃，那地球上的生命将注定灭绝。

有化石证据表明，大约35亿年前，地球上已经存在某种形式的生命。这也许是在地球变得稳定和足够冷却、使生命得以发展最简单形式之后的短暂的5亿年。但生命本可以在漫长的70亿年岁月中的任何时候在宇宙中发展最简单形式，并仍有足够时间进化出像我们一样的，能够询问生命起源的生物。如果在一个给定行星上产生生命的概率非常小，为什么它只花了大约十四分之一的可用时间，就在地球上出现了呢？

地球上生命出现这么早，说明在适当的条件下，自发产生生命的机会并不小。也许DNA是由更简单的生命形式合成的。而DNA一旦出现，就非常成功，以至于完全取代了早期的形式。我们不知道这些早期的形式是什么样的，但一种可能性是RNA。

RNA很像DNA，但简单多了，也没有双螺旋结构。短片断的RNA可以像DNA一样自我复制，最终还可能会合成DNA。我们尚不能在实验室中用非生物材料合成核酸，更不用说RNA了。但是，给予5亿年的时间，在覆盖了大部分地球的海洋之中，也许存在偶然合成出RNA的合理概率。

DNA自我复制时，会出现随机错误。其中很多都是有害的，因而被淘汰了；有些是中性的，这些不影响基因的功能；而一些错误会有利于物种的生存，这些就会被达尔文提出的自然选择法则保留下来。

生物进化过程起初非常缓慢。最早的细胞进化成多细胞生物大约花了25亿年。但接下来不到10亿年的时间内，有的就进化成了鱼类；随后，有的鱼类又进化成哺乳动物。再往后，进化似乎更快了。从早期的哺乳动物进化到我们人类，只花了大约1亿年。个中原因是早期的哺乳动物已经具有了我们基本器官的初级版本。从早期的哺乳动物进化到人

类只需要一点点微调。

但随着人类进化达到一个关键阶段，其重要性与DNA的产生相当。这就是语言的发生，尤其是书面语言的出现。它意味着，除了DNA的基因传递之外，信息也可以代代相传。在有记载的1万年的历史之中，由生物进化导致的人类DNA变化有些是可以检测到的，但代代相传的知识量增长巨大。我写过几本书，给你们介绍我在漫长的科学生涯中所掌握的关于宇宙的知识。这样做的过程中，就把知识从我的大脑里转到了书上，这样你就可以阅读。

人类的卵子或精子中的DNA含有大约30亿个核酸碱基对。但是，这个序列中编码的很多信息似乎是冗余或不活动的。因此，我们基因中有用信息的总量可能大约是1亿比特。1比特信息是对是/否问题的答案。相比之下，平装小说可能包含200万比特的信息。因此，一个人大约相当于50本《哈利波特》，一个国家图书馆可收藏大约500万本书，或大约10万亿比特。书籍或互联网上传递的信息量是DNA中的10万倍。

更重要的是，书籍中的信息可以更快地更改和更新。我们用了几百万年的时间，从不太先进的早期猿类进化而来。在那段时间里，我们DNA中的有用信息可能只改变了几百万比特，因此人类生物进化的速度大约是每年1比特。相比之下，每年约有50 000种以英文出版的新书，它们包含1 000亿比特数量级的信息。当然，这些信息的绝大多数都是垃圾，对任何形式的生命都没用。但是，即便如此，有用信息的增加速度仍然是数百万，如果到不了数十亿，也远高于DNA。

这意味着，我们已经进入了一个新的进化阶段。起初，进化是通过自然选择进行的——来自随机突变。这个达尔文阶段持续了大约35亿年并产生了我们，即发展语言来交换信息的人。但在过去的1万年左右，我们处于所谓的外部传输阶段。在此阶段，虽然在DNA中传递到后代的内部记录的信息有些变化，但与此相比，在书籍和其他持久的存储形式中的外部记录却已经极大增加。

有些人会把“进化”这个术语仅用于内部传播的遗传物质，反对将其应用于在外部传递的信息。但我认为这种观点过于狭隘。我们不仅仅是我们自身的基因。我们可能不比我们的穴居人祖先更强大或者天性上更聪明。但是与他们的不同之处在于我们在过去1万年，特别是过去300年积累的知识。我想采取更开阔的观点，将外部传播的信息和DNA一起包

括在人类的进化内是合理的。

外部传播进化期间的时间尺度就是信息积累的时间尺度。这曾经是数百甚至数千年。但是现在这个时间尺度缩小到大约50年或更短。另一方面，我们处理这些信息的大脑只以数十万年的达尔文的时间尺度来演化。这开始引起问题。在18世纪，据说有人读过每一本著作。但是现在，如果你每天读一本书，你会花几万年才能读遍一座国家图书馆的藏书。到了那个时候，又有更多的书已经写好了。

这意味着个人最多只能掌握人类知识的一小部分。人们必须专注于越来越狭窄的领域。这可能是未来的一个主要的限制。我们肯定不能长久地保持过去300年里知识的指数增长率。对后代的更大的限制和危险在于我们仍然拥有本能，特别是我们在穴居人时代就有的好斗的冲动。直至现在，侵略者征服或杀害其他男人，并掠夺他们的女人和食物，这种侵略方式明显具有生存优势。但现在它可以摧毁整个人类和地球上其余的大部分生命。核战争仍然是最急迫的危险，但还有其他一些危险，例如基因工程病毒的释放，或者温室效应变得不稳定。

我们来不及等待达尔文进化论把我们变得更聪明、更善良。而我们现在正进入一个可称为自我设计进化的新阶段，在这个阶段，我们将能够改变和改善我们的DNA。我们现在已经绘制了DNA，这意味着我们已经阅读了“生命之书”，所以我们可以开始改写更正。起初，这些改变将局限于遗传缺陷的修复——像囊性纤维化和肌营养不良症是由单个基因控制的，因此相当容易识别和纠正。其他品质如智力，可能受到大量基因的控制，要找到它们并找出它们之间的关系，就会困难得多。尽管如此，我相信在21世纪，人们会发现如何改善智慧和诸如好斗的本能。

反对人类基因工程的法律可能会被通过。但是有些人无法抵抗改善人类特征的诱惑，例如记忆力、抗病能力和生命长度。一旦这样的超人出现，未经改善的人类将面临重大的政治问题，他们将无法赢得竞争。想象得到，他们会死绝，或被边缘化。相反的，将会出现一群自我设计的生物，他们正以不断增长的速度完善自己。

如果人类设法重新设计自己，减少或消除自我毁灭的风险，它可能会散布到其他行星和恒星上去，并在那里殖民。但是，对于化学基础的生命形式，比如像我们这样的基于DNA的，长途太空旅行将很困难。这些生命的自然寿命与旅行时间相比太短。根据相对论，没有什么能比光

旅行得更快，所以从我们到最近的恒星的往返旅程将至少需要8年，而到银河系的中心则大约需要5万年。在科幻小说中，他们通过空间弯曲，或通过额外的维度来克服这个困难。但我认为这些都是永远不可能的，无论生命变得多么智慧。在相对论中，如果一个人可以比光旅行得更快，那么他也可以旅行回到过去，这会导致人们回到并改变过去的问题。人们还会预料已经看到大量来自未来的游客，他们好奇地瞧着我们古怪过时的生活方式。

我们也许可能使用基因工程使以DNA为基础的生命无限延长，或者至少存活10万年。但是，发送机器将是更容易的，这几乎已在我们的能力范围内。可以把机器设计得持续足够久直至完成星际旅行。当它们到达一颗新的恒星时，它们可以降落在合适的行星上并挖掘材料制造更多的机器，后者可以被发送到更多的恒星上。这些机器将是生命的一种新形式，它们是基于机械和电子元件而不是大分子。它们最终可以取代基于DNA的生命，就像DNA可能已经取代了早期的生命形式一样。



当我们探索银河系时，我们遇到一种外星生命形式的机会是多少？如果关于地球上生命出现的时间尺度的论证是正确的，那么应该存在许多其他恒星，其行星上拥有生命。其中一些恒星系统可能在地球之前50亿年就形成了。那么为什么银河系没有爬满着自我设计的机械或生物的生命形式？为什么地球没被它们访问甚至被殖民过？顺便说一句，我不太相信不明飞行物携带来自外太空生物的说法，因为我认为外星人的任何访问都会更加明显得多——而且可能也更不愉快得多。

那么为什么我们没被访问过？也许生命自动发生的概率就是如此之低，以至地球是银河系中或者在可观察的宇宙中唯一出现生命的行星。另一种可能性是存在合理概率形成自我复制系统，比如细胞，但大多数这些生命形式并没有演化出智慧。我们过去认为智慧生命是进化的不可避免的后果，但如果它并非如此又怎么办？人存原理应警告我们要警惕这些论点。进化更可能是一个随机过程，智慧只是众多可能的结果之一。

甚至智慧是否具有任何长期生存价值，这一点尚不清楚。如果地球上的所有其他生命都被我们消灭，细菌和其他单细胞生物可能继续存在。从演化的年表来看，也许地球上的生命不太可能进化出智慧，因为从单细胞到多细胞生物，它花了很长时间——25亿年，而多细胞生物是智慧的必要前提。这是太阳爆炸之前可用总时间的很大一部分，所以它与生命进化出智慧的概率很低的假设相符。在这种情况下，我们可能会在银河系中发现许多其他生命形式，但我们不太可能找到智慧生命。

另外，如果小行星或彗星与这个星球相撞，这是生命不能发展到智慧阶段的另一种可能原因。1994年，我们观察到了肖梅克·利维彗星与木星的碰撞。它产生了一系列巨大的火球。有人认为，大约6 600万年前一个小得多的天体与地球的碰撞，造成恐龙的灭绝。一些小的早期哺乳动物幸存下来，但任何像人类一样大的东西几乎肯定会被消灭。很难说这种碰撞发生的频率，但平均每两千万年可能是一个合理的猜测。如果这个数字是正确的，那就意味着地球上智慧生命的发展只是因为在过去的6 600万年中地球没有发生重大碰撞。银河系中的其他行星发展的生命可能没有足够长的无碰撞时期来进化成智慧生物。

第三种可能性是存在生命形成并演化为智慧生命的合理概率，但系统变得不稳定，智慧生命自我毁灭。这将是一个非常悲观的结论，我非常希望它不是真的。

我更喜欢第四种可能性：外太空还有其他形式的智慧生命，但我们却被忽视了。2015年，我参与了突破聆听计划的启动。突破聆听使用射电观测来寻找智慧的外星生命，并拥有最先进的设施、慷慨的资金和数千小时的专用射电望远镜时间。它是有史以来旨在寻找地球以外文明证据的规模最大的科学研究计划。突破性信息是一个国际竞争，旨在创造可让先进文明阅读的信息。但我们需要警惕，直到我们进一步发展之前，不要回答外星生命。在我们现阶段，遭遇更先进的文明，可能有点像美洲原住民遭遇哥伦布一样——我想他们认为他们的生活因之变得更糟。



如果智慧生命存在于地球以外的其他地方，
它会与我们所知道的形式相似，还是不同？

“地球上存在智慧生命吗？不过说认真的，如果其他地方有智慧生命，那么它必须在非常遥远之处，否则此前它就应访问过地球。我想如果我们被访问过，我们就已经知道了，这就像那部电影《独立日》。”

4 Can we predict the future？
我们能预测未来吗？

在古代，世界似乎非常任性。诸如洪水、瘟疫、地震或火山等灾害似乎总在没有任何警告或明显原因的情况下发生。原始人将这种自然现象归咎于众神，他们的行为既反复无常，又异想天开。没有办法预测他们会做什么，唯一的希望是通过礼物或行动赢得其青睐。当今许多人仍然部分赞同这一信念，并尝试与幸运缔结契约。如果他们的课程可以获得A等或通过他们的驾驶考试，他们就愿意改善行为或更好心。

然而，人们一定渐渐地注意到自然行为的某些规律性。这些规律在天体穿越天穹的运动中最为明显。所以天文学是第一门被发展的科学。300多年前，正是牛顿给予它坚实的数学基础，而我们仍然使用他的引力理论预测几乎所有的天体运动。跟随天文学的例子，人们发现其他自然现象也遵守明确的科学定律。这就导致了科学决定论的思想，这个思想似乎首先是由法国科学家皮埃尔-西蒙·拉普拉斯公开表达的。我想为你引用拉普拉斯的原话，可惜拉普拉斯就像普鲁斯特一样，爱写冗长和复杂的句子。所以我决定改述。实际上，他所说的是，如果我们知道宇宙中的所有粒子在某一时刻的位置和速度，那么我们就能够计算出它们在过去或将来任何其他时刻的行为。有一个可能是杜撰的故事说，当拿破仑问拉普拉斯如何将上帝纳入这个系统时，他回答说：“阁下，我不需要那个假设。”我不认为拉普拉斯声称上帝不存在。只是上帝没有介入打破科学规律。那应该是每个科学家的立场。如果科学定律只在某位超自然存在决定让事物自身运行而不介入时才成立，那么科学定律就不成其为科学定律。

拉普拉斯时代以来，宇宙在一个时刻的状态确定其他所有时间的状态的思想一直是科学的中心信条。这意味着我们至少在原则上可以预测未来。然而，在实践中，我们预测未来的能力受限于方程的复杂性以及它们通常具有称为混沌的属性这一事实。正如那些看过《侏罗纪公园》的人都知道，这意味着一个地方的微小干扰会导致另一个地方发生重大变化。一只蝴蝶在澳大利亚扇动翅膀会导致在纽约中央公园的大雨。麻烦的是，它不可重复。下一次蝴蝶拍翅膀时，其他很多东西会有所不同，也会影响天气。这种混沌因素是天气预报如此不可靠的原因。

尽管存在这些实际困难，科学决定论仍然是整个19世纪的正式教条。然而，在20世纪，有两项发展表明拉普拉斯对未来的完整预言的观点无法实现。其中第一项发展是所谓的量子力学。这是为了解决一个突出的悖论，由德国物理学家马克斯·普朗克于1900年提出的一个临时假设。根据可追溯到19世纪拉普拉斯时代的经典思想，一个热的物体，例如一块炽热的金属，应该发出辐射。它会在射电波、红外线、可见光、紫外线、X射线和伽马射线中都以相同的速率失去能量。这不仅意味着我们都会死于皮肤癌，而且宇宙中的一切都将处于相同的温度，显然事实并非如此。

然而，普朗克证明，如果放弃辐射量可取任何值的想法，而是说辐射仅以特定大小的波包或量子出现，就可以避免这场灾难。这有点像说你不能从超市买到散装的糖，它必须是每千克的袋装糖。紫外线和X射线的波包或量子中的能量比红外线或可见光的要高。它的意思是，除非物体非常热，如太阳，它甚至没有足够的能量发出紫外线或X射线的单独量子。这就是为什么我们不会被一杯咖啡灼伤。

普朗克认为量子的概念只是一种数学技巧，而不具有任何物理现实，无论这意味着什么。然而，物理学家们开始去找只能用某种量解释的其他行为——这种量的值是离散或量子化而非连续变化的。例如，人们发现基本粒子的行为和小陀螺相当像，它围绕一个轴旋转。但是其旋转量不能取任意值。它必须是一个基本单位的某个倍数。因为这个单位非常小，人们没注意到，正常的陀螺真的以快速的离散步骤的序列，而不是以一个连续的过程减慢速度。但是，对于小到像原子那样的陀螺，自旋的离散性质非常重要。

过了一段时间，人们才意识到这种量子行为对决定论的影响。直到1927年，另一位德国物理学家沃纳·海森伯才指出，你无法同时准确地测量粒子的位置和速度。要看到粒子的位置，人们就必须把光线照射在它上面。但是根据普朗克的研究，人们不能使用任意少量的光。一个人必须使用至少一个量子。这将扰乱粒子并以不可预测的方式改变其速度。要准确测量粒子的位置，你必须使用短波长的光，如紫外线、X射线或伽马射线。但是，还是根据普朗克的研究，这些形式的光的量子比可见光的能量更高。因此它们会更多地扰乱粒子的速度。这是一个绝望的情况：你越准确地测量粒子的位置，你就越不能准确地知道速度，反之亦然。这被概括为海森伯制定的不确定性原理：粒子位置的不确定性与速

度的不确定性的乘积，总是大于普朗克常数与2倍粒子质量的商。

拉普拉斯科学决定论的观点涉及知道粒子于某一瞬间在宇宙中的位置和速度。所以它被海森伯不确定性原理严重破坏。当一个人不能同时准确测量粒子此刻的位置和速度时，怎么能预测未来？不管你有一台多么强大的电脑，如果你把糟糕的数据输入，你就会得到糟糕的预测。

对于自然中的这个显然的随机性，爱因斯坦非常不快。他那著名的“上帝不掷骰子”反映了他的观点。他似乎认为不确定性只是暂时的，而且存在一个潜在的现实，其中粒子会有明确定义的位置和速度，根据拉普拉斯本意的确定性定律演化。上帝可能知道这个现实，但光的量子性质会阻止我们看到它，充其量也只能用不允许我们看到其细节的工具去观测。

爱因斯坦的观点现在被称为隐变量理论。隐变量理论可能是把不确定性原理融入物理学的最明显的方式。它们构成了许多科学家和几乎所有的科学哲学家持有的宇宙心理图像的基础。但这些隐变量理论是错误的。英国物理学家约翰·贝尔设计了一个实验检测，可以证伪隐变量理论。当人们小心翼翼地完成了该实验，发现结果与隐变量不一致。因此，似乎连上帝也受到不确定性原理的约束，无法同时知道粒子的位置和速度。所有的证据都表明上帝是一个上瘾的赌徒，他会在每一个可能的场合投掷骰子。

其他科学家比爱因斯坦更愿意修正19世纪经典决定论的观点。海森伯、奥地利的埃尔温·薛定谔和英国物理学家保罗·狄拉克提出了一种新的理论——量子力学。狄拉克的剑桥大学卢卡斯教席只在我的前任之前。虽然量子力学已经存在了将近70年，但它仍然没有得到普遍理解或欣赏，即使是那些使用它进行计算的人也如此。然而它应和我们所有的人都有关，因为它完全不同于物理宇宙和现实本身的经典图景。在量子力学中，粒子不具有明确的位置和速度。相反的，它们由所谓的波函数表示。这是在空间的每一点的一个数。波函数的大小给出了在该位置找到粒子的概率。波函数从点到点的变化率给出了粒子的速度。人们可以拥有在一个小区域取极大峰值的波函数。这将意味着在此位置不确定性很小。但是波函数在靠近峰顶会变化很大，一边向上，另一边向下。因此，速度的不确定性将很大。同样，人们可以拥有波函数，其速度的不确定性很小，但位置的不确定性很大。

波函数包含人们能够知道的关于粒子的一切，包括其位置和速度。如果你知道某一时刻的波函数，那么根据所谓的薛定谔方程就知道它在其他时刻的值。因此，人们仍然拥有一种决定论，但它不是拉普拉斯设想的那种。我们可以预测的全部只是波函数，而不能够预测粒子的位置和速度。这意味着，我们只能预测到根据19世纪的经典观点预测的一半。

当我们试图预测位置和速度时，虽然量子力学导致了不确定性，它仍然允许我们确切地预测位置和速度的一种组合。但是，即使是这个程度的确定性似乎还受到更新近的科学发展的威胁。问题的出现是因为引力可以把时空弯曲到某种程度，以至存在我们观察不到的空间区域。

这些区域是黑洞的内部。这意味着即使在原则上我们也不能观察到黑洞内的粒子。所以我们根本无法测量它们的位置或速度。那么就存在这是否会引入比在量子力学中发现的更进一步的不可预测性的问题。

总结一下，拉普拉斯提出的经典观点，如果人们知道某一时刻粒子的位置和速度，那么它的未来运动是完全确定的。当海森伯提出了他的不确定性原理之后，这种观点必须加以修改。该原理说，人们无法同时准确知道位置和速度。然而，仍有可能预测一个位置和速度的结合。但是如果考虑到黑洞，甚至这种有限的可预测性也可能消失。



制约宇宙的定律是否允许我们准确地预测到将来会有什么发生在我们身上？

“简短的回答既是否定的，也是肯定的。在原则上，定律允许我们预测未来。但在实践中，通常计算都太难了。”

5 What is inside a black hole？
黑洞中是什么？

据说事实有时候比小说更奇怪，而且找不到比黑洞的情况更能真实地体现这一点的了。黑洞比科幻作家梦想的任何东西都更奇怪，但它们是坚实的科学事实。

1783年，剑桥人约翰·米歇尔首次讨论了黑洞。他的论证如下：如果一个人垂直向上发射一个粒子，诸如一个炮弹，它会由于引力而减速。最终，粒子将停止向上运动，并将回落。然而，如果最初的向上速度大于某个临界值（称为逃逸速度），则引力永远不会强到足以阻止粒子，它就会逃脱。地球的逃逸速度仅稍大于每秒11千米，而太阳的逃逸速度约为每秒617千米。两者都是远远高于真正的炮弹的速度。但它们与光速相比又较低，光速是每秒30万千米。因此光可以轻而易举地离开地球或太阳。然而，米歇尔认为可能存在质量比太阳大得多的恒星，其逃逸速度比光速还大。我们将无法看到它们，因为它们发出的任何光都会被引力拖曳回来。因此它们被米歇尔称为暗星，而我们现在称之为黑洞。

为了理解它们，我们需要从引力开始。爱因斯坦的广义相对论描述了引力，这是一个空间和时间的，也是引力的理论。空间和时间的行为受制于一组称为爱因斯坦方程的方程，那是爱因斯坦于1915年提出的。虽然引力是迄今为止已知的自然力中最弱的，但它有两个比其他力更关键的优势。首先，它的作用是长程的。太阳距离我们9　300万英里，它将地球保持在轨道上，而太阳被保持在围绕银河系中心的轨道上，该中心大约在10　000光年远。第二个优势是引力总是吸引的，不像电力，它可以吸引，也可以排斥。这两个特征意味着，对于一个足够大的恒星，粒子之间的引力可以支配所有其他的力，并导致引力崩溃。尽管存在这些事实，科学界仍然未能很快地意识到大质量的恒星可能会在自己的引力作用下往自身坍缩，并弄清楚留下的天体会如何行为。阿尔伯特·爱因斯坦在1939年甚至写了一篇论文，声称恒星在引力作用下不能坍缩，因为物质不能被压缩超过某种程度。许多科学家分享了爱因斯坦的直觉。美国科学家约翰·惠勒是主要的异见者，他在很多方面都是黑洞故事中的英雄。在他20世纪50年代和60年代的研究中，他强调许多恒星最终会坍缩，并探讨了这对理论物理学带来的问题。他还预见到坍缩恒星变成的

天体——黑洞的许多属性。

在一颗普通恒星超过数十亿年寿命的大部分时间中，它将依赖把氢转化为氦的核过程产生的热压来抵抗其自身的引力。然而，这颗恒星最终将耗尽其核燃料，恒星将收缩。在某些情况下，它可能成为白矮星，那是恒星核心的密集残余。然而，1930年，苏布拉马尼扬·钱德拉塞卡证明白矮星的最大质量约为太阳的1 .4倍。俄罗斯物理学家列夫·兰道计算出一个类似的最大质量，适用于完全由中子构成的恒星。

那些质量大于白矮星或中子星最大质量的无数恒星，一旦耗尽了核燃料其命运将会如何？后来因原子弹成名的罗伯特·奥本海默研究了这个问题。1939年，他在和乔治·沃尔科夫与哈特兰·斯奈德合作的两篇论文中，证明了压力不可能支持这样的恒星。而如果人们忽视压力，均匀的球状对称的恒星就会收缩到一个无限密度的点。这样的点被称为奇点。我们所有的空间理论都是在基于时空是光滑的、几乎平坦的假设之上而表述的，所以它们在奇点处，即时空曲率无限处崩溃了。事实上，它标志着空间和时间本身的终结。这正是令爱因斯坦非常反感的东西。

然后第二次世界大战爆发了。包括罗伯特·奥本海默在内的大多数科学家，改为关注核物理，而引力坍缩问题基本上被遗忘了。随着被称为类星体的遥远天体的发现，对这个论题的兴趣又复活了。第一个类星体3 C 273于1963年被发现，许多其他类星体也很快相继被发现了。尽管它们远离地球，它们仍然很明亮。因为核过程作为纯粹的能量只释放出它们静止质量的一小部分，所以这无法解释它们的能量输出问题。唯一的替代解释是引力坍缩释放的引力能量。

恒星的引力坍缩被重新发现了。当发生这种情况时，物体的引力将其周围的所有物质向内吸引。很清楚，一个均匀的球状恒星将收缩到无限密度的一点，即奇点。但如果这颗恒星不是均匀的球状，将会发生什么呢？这种恒星物质的不对称分布是否会引起不均匀的坍缩，并避免出现奇点？在1965年的一篇引人注目的论文中，罗杰·彭罗斯证明，只要根据引力是吸引的这个事实，仍然会存在一个奇点。

爱因斯坦方程不能在奇点处定义，这意味着在这一具有无限密度的点上，人们无法预测未来。这意味着，只要一颗恒星坍缩就会发生奇怪的事情。如果奇点不是赤裸的，也就是说，它们对外界屏蔽的话，我们就不会受到预测崩溃的影响。彭罗斯提出了宇宙监督猜想：由恒星或其

他天体坍缩而形成的所有奇点都隐藏在黑洞内部而不被看到。黑洞是引力太强以至于光线无法逃逸的区域。宇宙监督猜想几乎肯定是正确的，因为许多证伪它的尝试都失败了。

约翰·惠勒在1967年提出“黑洞”这个术语，它取代了早先的“冻星”这个名字。惠勒的新造词强调，坍缩恒星的残余本身就很有趣，和它如何形成无关。新名字很快就广为流行。

从外面看，你不能知道黑洞里面是什么。无论你投入什么，或者无论它如何形成，黑洞看起来都是一样的。约翰·惠勒由于以“黑洞无毛”来表达这个原理而闻名于世。

黑洞有一个被称为事件视界的边界。正是在这个地方，引力刚好强到足以将光线拖曳回来并防止它逃脱。因为没有东西可以旅行得比光快，所以其他一切也都会被拖曳回来。跌入事件视界有点儿像乘独木舟越过尼亚加拉大瀑布。如果你是在瀑布上方，要是你足够快速划桨离开，你可以逃脱落下的命运。但是一旦你越过边缘就会完蛋，根本无法返回。当你越来越接近瀑布时，水流就变得越来越急。这意味着，拉独木舟的前部的力比拉后部的力更强大，独木舟会有被拉断的危险。黑洞的情形也一样。如果你的脚首先跌入黑洞，引力拉你的脚比拉你的头更厉害，因为脚离黑洞更近。结果你的纵向被伸展，而横向被压扁。如果黑洞的质量是我们太阳的几倍大，在到达视界之前，你就会被撕裂，变成意大利面条。然而，如果你陷入了一个大得多的黑洞，其质量超过太阳的100万倍，那么作用到你整个身体的引力拉力将是相同的，你就会毫无困难地到达视界。所以，如果你想探索一个黑洞的内部，一定要选择一个大黑洞。在我们的银河系中心有一个黑洞，其质量约为太阳的400万倍。

尽管当跌入黑洞时，你不会注意到任何特别的东西，但是从远处看你的人永远不会看到你越过事件视界。相反的，你似乎会放慢速度并在外面盘旋。你的形象会越来越暗淡，越来越红，直到你实际上从视线中消失。就外部世界而言，你将永远逝去。

在我的女儿露西出生后不久，我有了一个尤里卡时刻。我发现了面积定理。如果广义相对论是正确的，并且物质的能量密度是正的，就像通常这种情况，那么事件视界，即黑洞的边界的表面积，具有当额外物质或辐射落入黑洞时总是增加的性质。此外，如果两个黑洞碰撞并合并

成一个黑洞，则围绕被产生的黑洞的事件视界的面积大于围绕原先黑洞的事件视界的面积之和。面积定理可以通过激光干涉仪引力波天文台（LIGO）的实验测试。2015年9月14日，LIGO探测到来自两个黑洞的碰撞和合并的引力波。人们可以从波形估计黑洞的质量和角动量，并按照无毛定理确定视界面积。

这些性质暗示，在黑洞事件视界的面积和传统的经典物理学，特别是热力学中熵的概念之间存在相似之处。熵可以被视为对一个系统的混乱的测度，或者相当于对其精确状态的缺乏了解的测度。著名的热力学第二定律说，熵总是随着时间的推移而增加。这个发现是这个关键联系的第一个提示。

黑洞性质和热力学定律之间的类比可以被扩展。热力学第一定律说，一个系统的熵的微小变化伴随着该系统的能量的成比例变化。布兰登·卡特、吉姆·巴丁和我发现了一道类似的定律，它把黑洞质量的变化和视界面积的变化联系起来。这里的比例因子涉及一个被称为表面引力的量，它是在事件视界上的引力场强度的度量。如果人们接受事件视界的面积类似于熵，那么似乎表面引力类似于温度。事件视界上的所有点的表面引力都是相同的，这一事实使这个类似得到加强，正如处于热平衡的物体的温度处处相同一样。

尽管熵与事件视界的面积之间存在清楚的相似性，但该面积如何被确认为黑洞本身的熵对我们并非显而易见。黑洞的熵意味着什么？雅各布·贝肯斯坦于1972年提出了关键的建议，当时他是普林斯顿大学的一名研究生。该建议是这样的：当黑洞通过引力产生坍塌时，它迅速安定到一种静止状态，这种状态由质量、角动量和电荷这三个参数来表征。

这使得黑洞的最终状态似乎与坍缩的天体是由物质还是反物质组成，或者它是球状还是高度不规则形状无关。换句话说，给定质量、角动量和电荷的黑洞可由大量物质的不同配置中任何一个的坍缩而形成。这样看起来同样的黑洞可能是由大量的不同类型的恒星坍缩形成的。确实，如果忽略量子效应，由于黑洞本身可以由无限多的质量无限小的粒子云的坍缩形成，配置的数目将是无限的。但是，配置的数目真的可以是无限的吗？

众所周知，量子力学涉及不确定性原理。它断言，人们不可能同时测量任何物体的位置和速度。如果有人精确地测量某物的位置，那么它

的速度就是不确定的。如果有人测量某物的速度，那么它的位置就是不确定的。在实践中，这意味着无法对任何东西进行局域化。假设你想要测量某物的大小，那么你需要找出这个移动物体终端的位置。你永远不能准确地做到这一点，因为它将涉及测量该物在同一时刻的位置及速度。由此，则无法确定一个物体的尺寸。由于不确定性原理，你不可能准确地说出某物的大小真正是多少。其结论是，不确定性原理对物体大小施加了限制。经过些微计算后，人们发现，对于一个物体的给定质量，存在一个最小的尺度。对于重物而言，这个最小尺度很小，但是当看到越来越轻的物体时，最小尺度变得越来越大。这个最小尺度可被认为是在量子力学中物体可以同时被认为是波或粒子的这一事实的结果。物体越轻，其波长越长，因此更加分散。物体越重，其波长越短，因此看起来更紧凑。当这些思想与广义相对论相结合时，意味着只有比特定重量更重的物体才能形成黑洞。这个重量与一粒盐的重量大致相同。这些想法的进一步结果是，形成给定质量、角动量和电荷的黑洞的配置数目尽管可以非常大，但也还是有限的。雅各布·贝肯斯坦建议，从这个有限数目，人们可以解释黑洞的熵。这就是在创生黑洞的坍缩期间似乎无法挽回丧失的信息量的测度。

贝肯斯坦建议显然的致命缺陷是，如果黑洞拥有与其事件视界的面积成比例的有限的熵，那么它也应该具有非零温度，该温度与其表面引力成比例。这意味着黑洞能与某一非零温度下的热辐射处于平衡。然而根据经典概念，不存在这样的平衡，因为黑洞会吸收落在它上面的任何热辐射，但根据定义不能够反过来发出任何东西。它不能发射任何东西，也不能发射热。

这就产生了有关黑洞——由恒星坍缩创造的令人难以置信的密集天体——的性质的一个悖论。一种理论建议，具有相同性质的黑洞可以由无限数目的不同类型的恒星形成。另一个建议说，这个数字可能是有限的。这是一个信息论问题——宇宙中的每个粒子和每个力都包含信息的思想。

因为正如科学家约翰·惠勒所说，黑洞无毛，除了它的质量、电荷和旋转，人们无法从外面说出黑洞内部是什么。这意味着，黑洞必须包含大量对外面世界隐藏的信息。但是能塞到一个空间区域的信息量有个极限。信息需要能量，而根据爱因斯坦著名的方程$E=mc^2$，能量具有质量。所以，如果在一个空间区域存在太多信息，它将坍缩变成黑洞，而

黑洞的大小会反映信息量的多少。这就像把越来越多的书籍堆进图书馆。最终，书架就会垮掉，图书馆就会坍缩成黑洞。

如果隐藏在黑洞内的信息的数量取决于黑洞的大小，人们从一般原则能预期到黑洞会有一个温度，并会像一块热的金属一样发光，但那是不可能的，因为正如每个人都知道的那样，没有任何东西可以摆脱黑洞。至少那时候都是这么认为的。

这个问题一直持续到1974年初，当时我正在根据量子力学来研究黑洞附近物质的行为。令我十分惊讶的是，我发现黑洞似乎以恒定的速度发射粒子。和当时的其他人一样，我接受了黑洞无法发出任何东西的定论。因此，我相当努力想摆脱这种令人尴尬的效应。但是我越深入思考，它越拒绝消失，最后我不得不接受它。最终让我确信这是一个真实的物理过程的原因是，向外飞离粒子的谱恰好是热的。我的计算预测，黑洞会产生并发射粒子和辐射，就好像它是一个普通的热体一样，其温度与表面引力成正比，与质量成反比。这使得雅各布·贝肯斯坦提出的那个有问题的建议，即黑洞拥有有限的熵，完全自洽，因为它暗示黑洞可以在某个非零的有限温度下处于热平衡状态。

从那时起，其他许多人采用各种不同方法，证实了黑洞发出热辐射的数学证据。可以用以下的一种方法来理解黑洞发射。量子力学意味着整个空间充满了成对的虚的粒子和反粒子，这些粒子和反粒子不断成对出现、分离，然后再次聚集在一起，并相互湮灭。这些粒子被称为虚粒子，因为它们与真实粒子不同，所以不能直接用粒子探测器观察到。尽管如此，它们的间接影响仍然可以被测量到，而且已经由称为兰姆移位的小移动证实了它们的存在，兰姆移位是它们在来自受激氢原子的光的能谱中产生的。现在，在存在黑洞的情况下，一对虚粒子中的一个可能落入该黑洞中，而另一个失去了要与其相互湮灭的伙伴。被抛弃的粒子或反粒子可能在其伴侣之后也落入黑洞，但它也可能逃逸到无限远，在那里它就呈现为黑洞发出的辐射。

另一种看待该过程的方法是将落入黑洞的该对粒子的一员，比如说反粒子，视为真正的正在时间中向后倒退的粒子。就这样反粒子落入黑洞可以算是作为从黑洞出来但正在时间中向后倒退的粒子。当该粒子到达其反粒子对原先出现的那一点时，它被引力场散射，这样它就在时间中前进。一个太阳质量的黑洞会以如此缓慢的速率泄漏粒子，其速率无法被检测到。然而，可能会存在更小的迷你黑洞，比如具有一座山的质

量。这些可能已经在极早期宇宙中形成，如果那时宇宙是混沌和无规的话。山岳大小的黑洞会发射X射线和伽马射线，其功率约为1　000万兆瓦，足以为世界供电。然而，利用迷你黑洞并不容易。你无法将它保存在发电站中，因为它会穿过地板掉落并最终结束于地球的中心。如果我们有这样的黑洞，保持它的唯一方法是让它在围绕地球的轨道上运行。

人们一直在寻找这种质量的迷你黑洞，但到目前为止还未找到。这太可惜了，因为，如果他们找到，我就会获得诺贝尔奖。然而，另一种可能性是我们可能在额外的时空维度上创造微小的黑洞。根据某些理论，我们所经历的宇宙只是十维或十一维空间中的四维面。电影《星际穿越》给出了一些有关这些思想的画面。我们看不到这些额外的维度，因为光不能通过它们传播，而只能通过我们宇宙的四个维度传播。然而，引力会影响额外的维度，并且比在我们的宇宙中强得多。这样在额外的维度上形成一个小黑洞可能会容易得多。有可能在瑞士CERN的LHC大型强子对撞机上观察到这一点。这包括一条27千米长的圆形隧道。两束粒子以相反的方向围绕该隧道行进并且被迫碰撞。一些碰撞可能会产生微黑洞。这些黑洞会以易于识别的模式辐射粒子。所以我终究可以获得诺贝尔奖[1]。

当粒子从黑洞中逃逸出来时，黑洞将失去质量并收缩。这将增大粒子的发射速率。最终，黑洞将失去其所有质量并消失。那么落入黑洞的所有粒子和不幸的宇航员会发生什么呢？当黑洞消失时，它们不能就那么重新出现。从黑洞中出来的颗粒似乎是完全随机的，并且和落进去的是什么无关。关于落进东西的信息，除了总质量和旋转量外，似乎都丢失了。但如果信息丢失，这引发了一个直击我们理解科学的核心的严重问题。200多年来，我们一直相信科学决定论。也就是说，科学定律决定了宇宙的演化。

如果信息真的丢失在黑洞中，我们就不能够预言未来。因为黑洞可以发射任何粒子集合，它可能放出一台正常工作的电视机或皮质精装版的莎士比亚的全集，尽管这种奇异发射的可能性非常低。它发出热辐射的可能性要大得多，正如炽热的金属发光。我们不能预言从黑洞会出来什么似乎无关紧要。我们附近毕竟没有任何黑洞。但这是一个原则问题。如果决定论，即宇宙的可预测性因黑洞而崩溃，它在其他情况下也可能崩溃。可能存在虚拟黑洞，它表现为偏离真空的涨落。虚拟黑洞吸收一组粒子，发射另一组粒子，并再次消失在真空中。甚至更糟糕的

是，如果决定论崩溃，我们也就不能确定我们过去的历史。历史书籍和我们的记忆可能只是幻想。正是过去告诉我们，我们是谁。没有它，我们就失去了自己的本我。

因此，确定信息是否确实在黑洞中丢失，或者在原则上是否可以恢复信息非常重要。许多科学家认为信息不应该丢失，但多年来没有人提出可以保持信息的机制。这种明显的信息丢失，被称为信息悖论，在过去的40年中一直困扰着科学家们，并且仍然是理论物理学中最大的未解决问题之一。

最近，随着关于引力和量子力学统一的新发现，已重新唤起人们对信息悖论的可能解决方案的兴趣。这些新近突破的核心是理解时空的对称性。

假设没有引力，而时空是完全平坦的。这就像一个完全没有特色的沙漠。这样的地方有两种对称。第一种称为平移对称性。如果你从沙漠中的一个点移动到另一个点，你就觉察不到任何变化。第二种是旋转对称性。如果你站在沙漠中的某个地方并开始转身，你再次觉察不到所见有何不同。这些对称性也是“平坦”时空，也就是在没有任何物质的时空中具有的对称性。

如果一个人把某物放进这个沙漠，这些对称性就会被打破。假设在沙漠中有一座山、一片绿洲和一些仙人掌，那么在不同的地方和不同的方向就显得不同。时空也是如此。如果人们把物体放入时空，平移和旋转对称性就被破坏。而放入时空的物体也就是产生引力的东西。

黑洞是时空的一个区域，那里的引力强大，时空被剧烈扭曲变形，所以人们可以预料它的对称性被打破。然而，当人们远离黑洞，时空的曲率就越变越小。在离开黑洞非常遥远的地方，时空看起来非常像平坦时空。

早在20世纪60年代，赫曼·邦迪、A.W.肯尼思·梅茨纳、M.G.J.范德堡和赖纳·萨克斯就有真正卓越的发现，远离任何物质的时空拥有称为超平移对称的无数集合。这些对称中的每一个都和被称为超平移荷的一个守恒量相关联。守恒量是不会随着系统的演化而改变的量。这些是人们更为熟悉的守恒量的推广。例如，如果时空不随时间变化，那么能量就守恒。如果时空在空间的不同点处看起来相同，则动量就守恒。

发现超平移的非凡之处在于远离黑洞之处存在无限数目的守恒量。正是这些守恒定律为引力物理中的过程提供了非凡和意想不到的洞察。

2016年，我和我的合作者马尔科姆·佩里和安迪·斯特罗明格一起努力将这些新结果及其相关的守恒量用于寻找信息悖论的可能解决方案。我们知道，黑洞的三个可辨识特性是它们的质量、电荷和角动量。这些是早已被理解的经典的荷。然而，黑洞还携带有超平移荷。因此，黑洞可能拥有比我们最初以为的要多得多的荷。它们并不是秃头或只有三根毛，实际上有非常大量的超平移的毛。

这些超平移毛可能会编码有关黑洞内部有什么的一些信息。这些超平移荷可能不包含所有信息，但其余的可能会由一些额外的守恒量，超旋转荷来解释，后者与称为超旋转的某些额外相关的对称相关联，然而，对于它们我们还理解得不太透彻。如果以上所叙是对的，而关于黑洞的全部信息可以按照它的“毛”来理解，那么信息也许没有损失。这些想法刚刚被我们最近的计算所确认。斯特罗明格、佩里和我以及研究生萨沙·哈科已经发现这些超旋转荷也许可以解释任何黑洞的全部的熵。量子力学继续成立，而信息存储在视界，即黑洞表面上。

黑洞仍然只由它们的整体质量、电荷和事件视界外的旋转来表征，但事件视界本身以某种方式，包含除了黑洞拥有的这三个特征外有关落进的东西的信息。人们还在研究这些问题，因此信息悖论仍未解决。但我对此很乐观，我们正趋向解决这个悖论。请关注此领域的进展。



对于太空旅行者，跌入黑洞是否为坏消息？

“绝对是坏消息。如果它是一个恒星质量的黑洞，你会在到达视界之前被制成意大利面。另一方面，如果它是一个超大质量的黑洞，你将轻松地越过视界，但在奇点处被毁灭。”

6 Is time travel possible？
时间旅行可能吗？

在科幻小说中，空间和时间弯曲可谓司空见惯。它们用于在银河系周围快速旅行或穿越时间。不过今天的科幻小说通常是明天的科学事实。那么时间旅行的可能性如何？

空间和时间可以弯曲或扭曲的想法是很近代时才出现的。2 000多年来，欧几里得几何学的公理被认为是不言而喻的。正如那些被迫在学校学习几何学的人所记得的那样，这些公理的推论之一是三角形的内角和是180度。

然而，在20世纪，人们开始意识到可能存在其他形式的几何，其中三角形的内角和不必是180度。例如，考虑一下地球表面。在地球表面上最接近直线的就是所谓的大圆。它们是两点之间的最短路径，因此也是航空公司使用的路线。现在考虑地球表面上的三角形，它是由赤道、通过伦敦的0度经线和通过孟加拉国的东经90度经线组成。这两条经度线以直角或90度与赤道相遇。这两条经线也在北极呈直角，或90度相遇。因此这是一个三个直角的三角形。这个三角形的内角和是270度，这显然比平面上的三角形的180度更大。如果一个人在马鞍形面上画了一个三角形，就会发现其内角和小于180度。

地球表面就是所谓的二维空间。也就是说，你可以在地球表面上相互成直角的两个方向上移动，你可以在南北或东西方向移动。不过当然存在与这两个方向成直角的第三个方向，那是上升或下降的方向。换句话说，就是地球表面存在于三维空间中。该三维空间是平坦的，也就是说它服从欧几里得几何——三角形的内角和为180度。然而，人们可以想象一种二维动物，它们可以在地球表面上运动，但不能体验向上或向下的第三个方向。它们不会知道地球表面所处的平坦三维空间。对于它们来说，空间将是弯曲的，而几何将是非欧几里得的。

但正如人们可以想到二维生物生活在地球表面一样，人们可以想象我们所居住的三维空间是在我们看不到的另一个维度中的球体表面。如果球体非常大，则空间几乎是平坦的，欧几里得几何在小距离上是非常

好的近似。但是我们会注意到欧氏几何在很远的距离上会失效。作为它的一个图解，想象一群油漆工往一个大球的表面添加油漆。

随着涂料层厚度的增加，表面积会增加。如果球是在一个平坦的三维空间中，人们可以无限地添加油漆，并且球会变得越来越大。然而，如果三维空间确实是另一个维度的球体表面，那么它的体积会很大但是有限。随着人们添加更多的涂料层，球最终会填充一半的空间。在那之后，油漆工会发现他们被困在一个尺度不断缩小的区域中，几乎整个空间都会被这球和它的油漆层占据。所以他们会知道自己生活在弯曲的空间而不是平坦的空间中。

这个例子表明人们无法像古希腊人认为的那样，从第一原理出发推断出世界的几何。相反，我们必须测量我们居住的空间，通过实验找出它的几何形状。然而，虽然早在1854年德国人波恩哈德·黎曼就发展了一种描述弯曲空间的方法，但它在60年间仍然只是一门数学。它可以描述存在于抽象中的弯曲空间，但似乎没有理由认为我们生活其中的物理空间应该是弯曲的。只到1915年爱因斯坦提出广义相对论后，这个理由才出现。

广义相对论是一场重大的智慧革命，它变革了我们对宇宙的思考方式。它不仅是弯曲空间的理论，也是弯曲或翘曲的时间的理论。爱因斯坦在1905年就意识到空间和时间彼此密切相关，那是当他的狭义相对论诞生之时，狭义相对论使得空间和时间相互关联起来。人们可以将一个事件的位置由四个数字表示。三个数字描述事件的位置。它们可能是从牛津广场往北和往东以及高于海平面的英里数。在更大的尺度，它们可能是银河系的纬度、经度和到银河系中心的距离。

第四个数字是事件发生的时间。从而人们可以将空间和时间视为一个四维的称为时空的实体。时空的每一点由四个数字标记，指定其在空间和时间中的位置。如果只能够以一种特定的方式分解空间和时间，那么这种将空间和时间结合成时空的方式将是相当平常的。也就是说，只有某种特定的方式来定义每个事件的时间和位置。然而，1905年当爱因斯坦担任瑞士专利局职员时，他在一篇非凡的论文中证明了，一个人认为事件发生的时间和地点取决于他或她如何运动。这意味着时间和空间彼此密不可分。

如果不同观察者不做彼此相对运动，则他们指定给事件的时间将是

一致的。但是他们的相对速度越快就越不一致。因此，人们可以问，一个人需要运动多快，才能使一个观察者的时间前进而相对于另一个观察者的时间倒退。答案在下面的打油诗中给出：

有位名叫怀特的姑娘

旅行速度赛过了光

她在某天出发

却凭相对论到达

出发前一天的晚上

所以我们做时间旅行只需一艘走得比光还快的宇宙飞船。不幸的是，在同一篇论文中爱因斯坦还证明了，宇宙飞船的速度越接近光速，对它进行加速所需的火箭功率就越来越大。因此，它需要耗费无限的功率才能被加速到超过光速。

爱因斯坦1905年的论文似乎排除了回到过去的时间旅行的可能性。它还表明空间旅行到其他恒星将是一个非常缓慢和乏味的事。如果一个人不能比光走得更快，那么从我们到最近的恒星来回之旅至少需要8年，而到银河系中心约需5万年来回。如果宇宙飞船以非常接近光速的速度飞行，对在船上的人而言，到银河系中心也许只用了几年时间。但那实在没什么值得安慰的，因为当你返回时，你认识的所有人都早已在几千年前死去并被遗忘了。这也不是科幻小说的好题材，所以作家们不得不寻找摆脱这种困难的办法。

1915年，爱因斯坦展示了引力的效应可被描述为时空被其中的物质和能量所弯曲或扭曲，而这个理论被称为广义相对论。我们可以从光或者射电波在太阳附近掠过时被稍微偏折的现象中，实际观测到太阳质量引起的时空弯曲。

当太阳位于地球和源之间时，会导致恒星或射电源的表观位置略微移动。移动非常小，大约千分之一度，相当于一英里距离的一英寸移

动。尽管如此，它还是可以被非常精确地测量，并且与广义相对论的预测一致。我们有实验证据表明空间和时间是弯曲的。

因为太阳系中的所有引力场都很弱，所以我们附近的弯曲量非常小。然而，我们知道可能会发生很强的场，例如在大爆炸或黑洞中。那么空间和时间是否能被弯曲到足够程度，以满足科幻对超空间引擎、虫洞或时间旅行等方面的需要？乍一看似乎所有这些都是可能的。例如，1948年，库尔特·哥德尔找到了爱因斯坦广义相对论场方程的一个解，它代表了一个所有物质都在旋转的宇宙。在这个宇宙中，你可以乘宇宙飞船出发，而在出发前回来。哥德尔曾在普林斯顿高级学术研究所工作，爱因斯坦也在那里度过了他的晚年。哥德尔名震天下的原因是他证明了，即使在像算术这样一个看似简单的学科中，你也无法证明所有真的命题。不过他证明了广义相对论允许时间旅行，这真的让爱因斯坦感到不安，爱因斯坦早先认为这是不可能的。

我们现在知道哥德尔的解无法代表我们生活其中的宇宙，因为它不在膨胀。此外，此解中称为宇宙常数的量具有相当大的值，而一般我们相信其数值很小。但是，从那以后允许时间旅行的显然更合理的一些解被发现了。从弦理论的方法出发，可以得到一个特别有趣的解，它包含两道以非常接近但略低于光速的速度彼此滑动而过的宇宙弦。宇宙弦是理论物理学的一个非凡的想法，科幻作家们似乎还未能领略其奥妙。正如它们的名字所暗示的那样，它们像弦一样，拥有长度，但横截面很小。实际上它们更像橡皮筋，因为它们承受巨大的张力，诸如十万亿亿亿吨。把一根宇宙弦系到太阳上仅用三十分之一秒就能把它从零加速到每小时60英里。

宇宙弦可能听起来很牵强，像纯粹的科幻，但有很好的科学理由相信它们可在大爆炸后不久的极早期宇宙中形成。因为它们是处在这样大的张力之下，人们可以预料到它们被几乎加速到光速。

哥德尔宇宙和快速运动宇宙弦时空的共同点就是它们一开始就如此变形和弯曲，时空曲折地回到自身，并始终可能旅行到过去。也许上帝本可以创造这样一个弯曲的宇宙，但我们没有理由认为他真这么做了。所有证据都表明宇宙始于大爆炸，没有允许旅行进入过去所需的弯曲。由于我们不能改变宇宙开始的方式，时间旅行是否可能的问题就变成，我们是否可以随后使时空如此弯曲，以至于人们可以回到过去？我认为这是一个重要的研究课题，但必须注意不要被标记为怪物。如果有人申

请研究补助来研究时间旅行，它将立即被驳回。任何政府机构都不许把公共资金花费在任何像时间旅行这么异端的项目上。相反，人们必须使用技术术语，如闭合时间曲线，作为时间旅行的代名词。然而，这是一个非常严肃的问题。由于广义相对论可以允许时间旅行，那在我们的宇宙中允许吗？如果不允许，那又为什么呢？

与时间旅行密切相关的是从太空中的一处快速运动到另一处的能力。正如我以前说过的，爱因斯坦证明，需要无限的火箭能量才能将宇宙飞船加速到超光速。因此，在合理的时间内从银河系的一侧到达另一侧的唯一方法似乎是我们将时空弯曲到足够程度，从而制造出一个小管或虫洞。这可以连接银河系的两侧并充当从一侧到另一侧的近路，在你返回时，你的朋友还活着。人们非常认真地暗示这种虫洞可在未来文明的能力范围内实现。不过，如果你可以在一两个星期内从银河系一边旅行到另一边，你就能够通过另一个虫洞返回，并在你出发之前到家。你甚至可以设法用一个虫洞在时间中旅行到过去，如果它的两端彼此相对运动的话。

人们可以证明，创造一个虫洞需要以与正常物质弯曲时空相反的方式来弯曲它。普通物质将时空向自身弯曲，使之像地球表面一样。然而，要创建一个虫洞，就需要物质以相反的方式弯曲时空，使之像马鞍面一样。如果宇宙开始时并没有弯曲到允许时间旅行，那么对于弯曲时空使之能允许旅行到过去的任何其他方式，这同样成立。人们需要的是拥有负质量和负能量密度的物质，得以使时空以所需的方式弯曲。

能量和金钱相当像。如果你有正的银行存款余额，你可以通过各种方式分发。但是，根据直到不久前还被人相信的经典定律，你不允许透支能量。因此，这些经典定律将排除我们以允许时间旅行所需的方式弯曲宇宙的可能性。然而，经典定律被量子理论推翻了，量子理论是除了广义相对论之外我们的宇宙图景的另一次伟大革命。量子理论更加放松，允许你对一两个账户透支，只要银行那么通融的话。换句话说，量子理论允许能量密度在某些地方是负的，倘若它在其他地方是正的。

量子理论允许能量密度为负的原因在于它是基于不确定性原理。这表示某些量，诸如粒子的位置和速度，不可以都具有明确定义的值。一个粒子的位置定义得越精确，其速度的不确定性就越大，反之亦然。不确定性原理也适用于电磁场或引力场等领域。这意味着即使在我们认为是空的空间中，这些场也不能精确为零。因为如果它们精确为零，那么

它们的值将具有明确定义的零位置和明确定义的速度，该速度也为零。这将违反不确定性原理。相反，这些场必须具有一定的最小涨落量。人们可以将这些所谓的真空涨落解释为，粒子和反粒子对突然一起出现，分开然后再一起回来，并相互湮灭。

这些粒子和反粒子对被称为是虚拟的，因为人们不能用粒子探测器直接测量到它们。但是，人们可以间接地观察它们的影响，其中一种方法是所谓的卡西米尔效应。想象一下，你有两块平行的相距很近的金属板，板的作用就像虚粒子和反粒子的镜子。这意味着板之间的区域有点像一个风琴管，只会允许光波的某些共振频率。结果是板之间的真空涨落或虚粒子的数量与在它们外面的数量略有不同，而在外面，真空涨落可有任意波长。板块之间与外部的虚粒子数量相比的差异意味着，它们在板的一侧与另一侧不会施加相同的压力。因此存在将板推到一起的轻微的力，这个力已被实验测量到。所以，虚粒子实际存在并产生真实效应。

因为板之间的虚粒子或真空涨落较少，它们相比外面区域拥有较低的能量密度。但远离板的空虚空间的能量密度必须为零，否则它会弯曲时空，而宇宙就不会是几近平坦的。因此，板之间区域的能量密度必须为负的。

这样，我们从光的偏折中获得了实验证据，即时空是弯曲的，并且卡西米尔效应证实我们可以在负方向上弯曲它。因此，看起来随着我们在科学和技术方面的进步，我们也许能够构建虫洞或以其他方式弯曲空间和时间，从而能够旅行到我们的过去。如果这种情况发生，就会引发一大堆疑问和问题。其中之一就是如果将来可以进行时间旅行，为什么还没有人从未来回来告诉我们该怎么做。

即使有充分的理由让我们处于无知之中，根据人性使然，很难相信有人不会炫耀并告诉我们这些无知之人关于时间旅行的秘诀。当然，有些人会声称我们已经被未来的客人访问过。他们会说，不明飞行物来自未来，政府正忙于进行一场巨大的阴谋来掩盖它们，并自己保留这些游客带来的科学知识。我能说的只是，如果政府隐藏某些东西，他们在从外星人身上提取有用信息方面做得很差。我对阴谋论相当怀疑，因为我相信更可能是荒唐的理论。关于不明飞行物的目击报告不能都是外星人引起的，因为它们是相互矛盾的。但是，一旦你承认了一些是错误或幻觉，它们全都如此的可能性难道不比从未来，或从银河系的另一边来的

人访问我们的可能性更大吗？如果他们真的想要殖民地球或警告我们某些危险，那么他们相当无效率。

一种可能协调时间旅行与我们似乎从未见过任何来自未来的访客这一事实的办法，一方面，是说这种旅行只能发生在将来。根据这个观点，人们会说时空在我们过去是固定的，因为我们观察过它，而且看到它没有足够的弯曲允许旅行到过去。另一方面，未来是开放的。所以我们也许能够将它弯曲得足以允许时间旅行。不过因为我们只能在未来弯曲时空，我们无法回到现在或更早。

这个设想可以解释为什么我们没有被来自未来的游客淹没。但它仍然会留下大量的悖论。假设有可能搭乘火箭飞船出发，而且在你出发前已经回来。有什么办法会阻止你预先炸毁在发射台上的火箭或以其他方式阻止你自己出发？还有这个悖论的其他版本，比如在你出生之前回去杀死你的父母，但它们基本上是等同的。似乎有两种可能的解决方案。

一种是我称之为协调历史的方法。它说人们必须找到物理方程的协调的解，即使时空弯曲到可能旅行到过去。在这个观点中，除非你已经回来并且未能炸毁发射台，否则你无法乘火箭飞船出发以回到过去。这是一个协调的图景，但这意味着我们是完全被决定的，我们无法改变我们的意向。自由意志就这么多。

另一种可能性是我称之为选择历史的方法。物理学家大卫·多伊奇一直支持推动这个设想，它似乎也是《回到未来》的创作者默认的。这个观点认为，在一个选择历史中，在火箭出发之前不会有来自未来的任何回归，因此没有被炸毁的可能性。不过当旅行者从未来返回时，他会进入另一个选择历史。在这种情况下，人类为建造太空飞船做出了极为巨大的努力，但就在它即将发射之前，一个类似的太空飞船从银河系的另一侧出现并将自己摧毁。

大卫·多伊奇声称从物理学家理查德·费曼提出的历史求和概念中得到对选择历史方法的支持。其思想是，根据量子理论，宇宙并不仅仅存在一个独特的单一历史。相反，宇宙拥有每一个可能的历史，每个历史都有其概率。一定存在这样一个可能的历史，中东有持久的和平，虽然也许概率很低。

在某些历史中，时空会如此弯曲，诸如火箭这样的物体将能够旅行

到它们的过去。但每个历史都是完整而自足的，不仅描述弯曲的时空，还描述时空中的物体。所以当火箭再绕一圈回来，它不能转移到另一个选择历史。它仍然在同一历史中，该历史必须自我一致。因此，尽管多伊奇有他的想法，我还是认为历史求和的思想支持协调历史假设，而不是选择历史的思想。

因此，我们似乎只好坚持协调历史的图景。但是，如果时空被如此弯曲，以至于在宏观区域可能进行时间旅行的历史的概率非常小，那么这不需要涉及决定论或自由意志的问题。这就是我所说的时序保护猜想：物理定律合谋防止在宏观尺度上的时间旅行。

发生的事情似乎是，当时空被弯曲至几乎足以允许旅行到过去时，虚粒子则沿着封闭的轨迹几乎可以成为真正的粒子。虚粒子的密度和它们的能量变得非常大。这意味着，这些历史的概率非常低。这样，似乎可能存在时序保护机制，它使世界对历史学家而言是安全的。但是这个空间和时间弯曲的课题仍然处于起步阶段。根据被称为M理论的弦理论的统一形式，这是我们统一广义相对论和量子理论的最佳希望，时空应该有十一个维度，而不仅仅是我们经历的四个维度。该思想是，这十一个维度中的七个被蜷缩成一个小到我们觉察不到的空间，另一方面，剩下的四个方向相当平坦，正是我们称之为时空的东西。如果这个图景是正确的，那么也许可以安排四个平坦方向去混合七个高度弯曲或翘曲的方向。这会引起什么我们还不知道。但它打开了激动人心的可能性。

总之，根据我们目前的理解，不能排除快速太空旅行和在时间中旅行回去。它们会造成很大的逻辑问题，所以让我们希望存在时序保护定律，以阻止人们回去杀害他们的父母。

●

为时间旅行者举办派对有意义吗？
你期待会有人出席吗？

“2009年，在我的剑桥龚维尔和基斯学院，我为了一部关于时间旅行的电影，为时间旅行者举办了一个酒会。为了确保只有真正的时间旅行者来，直到聚会结束后，我才发出邀请。在聚会的那天，我坐在学院里期盼，但没有人来。我很失望，但并不感到惊讶，因为我已经证明，如果广义相对论是正确的，能量密度是正的，那么时间旅行是不可能的。如果我的一个假设被证明是错误的，我会很高兴。”

7 Will we survive on Earth？
我们能在地球上存活吗？

《原子科学家公报》是由一些曾参与曼哈顿计划制造第一颗原子武器的物理学家创办的一份期刊。2018年1月，它将世界末日时钟拨到午夜前2分钟，该钟是他们对我们行星所面临的军事或环境灾难的紧迫性测度。

该时钟有一段有趣的历史。它始于1947年，当时原子时代刚刚开始。曼哈顿计划的首席科学家罗伯特·奥本海默在两年前，也就是1945年7月发生的第一次原子弹爆炸事件时说道：“我们知道世界将从此不同。有人笑了，有人哭了，大多数人沉默了。我记得出自印度教经文的句子，《博伽梵歌》中的一句，‘现在我成为死神，世界的毁灭者’。”

1947年，时钟最初被设定为午夜前7分钟。除了20世纪50年代初的冷战开始时，现在比那时起的任何时候都更接近世界末日。当然，末日时钟及其移动完全是象征性的，但我觉得有必要指出，必须认真对待其他科学家发出这样惊人的警告，它至少部分是由于唐纳德·特朗普的获选引发的。末日时钟，时间在消逝或者甚至人类面临末日的思想，是现实还是危言耸听？它的警告是否及时，或纯粹浪费时间？

我对时间有非常个人的兴趣。首先，在科学界以外，我出名的主要原因是我那部名为《时间简史》的畅销书。有些人可能会以为我是时间专家，当然如今专家的名声并不都好。其次，作为一个21岁即被告知只有5年可活的人，在2018年已经76岁了——我是在另一种意义上的时间专家，亲身经历的专家。我很不舒服地敏锐地意识到时间的流逝，而且在我的大部分生命中都会感受到，正如他们所说的，我获得的时间是借来的。

毫无疑问，在政治上，现在我们的世界比我记忆中的任何时候都更不稳定。许多人感到在经济和社会方面都被抛弃了。结果，他们转向民粹的——或者至少俘获人心的政客，这些人行政经验有限，在危机中做出冷静决定的能力尚未经受考验。由于莽撞或恶意的力量促使末日之战的前景陡增，因此这意味着世界末日时钟应该更接近临界点。

地球受到许多领域的威胁，我很难乐观。威胁实在太大太多。

首先，地球对我们而言变得太小了。我们的物质资源正以惊人的速度消耗殆尽，我们向地球呈上气候变化的灾难性礼物。气温上升、极地冰盖减少、森林砍伐、人口过多、疾病、战争、饥荒、缺水和动物物种毁灭，这些都是可以解决的，但到目前为止还未解决。

全球变暖是由我们所有人造成的。我们想要汽车、旅行和更好的生活标准。麻烦在于，当人们意识到正在发生的事情时，可能为时已晚。当我们站在第二个核时代的边缘，面临一个前所未有的气候变化时期，科学家们有特别的责任再次向公众宣传并提醒领导者人类面临的危险。作为科学家，我们理解核武器的危险及其毁灭性的效应，我们也了解到人类活动和技术如何正在以可能永远改变地球生命的方式影响气候系统。作为世界公民，我们有责任去分享这些知识，并提醒公众警觉我们每天遭遇的不必要风险。如果政府和社会现在不采取行动，去淘汰核武器并防止气候进一步恶化，我们就面临着非常巨大的危险。

与此同时，就在我们的世界正面临一系列关键环境危机的时刻，许多政客还在否认人为造成的气候变化的现实，或至少否认人类有扭转它的能力。危险在于，全球变暖可能会变成自持续的，如果还没有变成这样的话。北极和南极冰盖的融化减少了反射回太空的太阳能，因此会进一步提高温度。气候变化可能彻底毁灭亚马孙和其他热带雨林，从而失去从大气中除去二氧化碳的一种主要方式。海水温度上升可能会引发二氧化碳大量释放。这两种现象都会增加温室效应，使全球变暖加剧。这两种效应都可以使我们的气候变得像金星的气候，酷热和下硫酸雨，温度为250摄氏度。人类的生命将不能维持。我们需要超越1997年通过的国际协议《京都议定书》，并立即减少碳排放。我们拥有这个技术。我们只需要政治意愿。

我们可以是无知、不思考的群氓。当我们在历史上遇到类似的危机时，通常会去其他地方殖民。哥伦布于1492年发现了新世界时这么做了，但现在没有新世界。附近没有乌托邦。我们的空间已经不多了，唯一可去的地方是其他世界。

宇宙是一个暴烈的地方。恒星吞没了行星，超新星在太空中发射致命射线，黑洞相互撞击，小行星每秒疾驶数百英里。我承认，这些现象并未让空间听起来非常诱人，但这些正是我们要冒险进入太空而非原地

不动的原因。我们无法防御小行星碰撞。我们最后一次大碰撞大约发生在6 600万年前，人们认为恐龙因之灭绝，而它将再次发生。这不是科幻小说，它受物理定律和概率的保证。

核战争仍可能是当下人类最大的威胁。这是我们几乎忘记了的危险。俄罗斯和美国都不再好战，但是假设发生了事故，或恐怖分子掌握这些国家仍然拥有的武器呢？越多国家获得核武器，风险就越大。即使在冷战结束之后，仍有足够重复数次杀死我们所有人的核武器库存，而新的核国家会增加不稳定性。随着时间的推移，核威胁可能会减少，但其他威胁会发展，所以我们必须保持警惕。

无论如何，我认为以下灾难几乎是不可避免的，无论是核对抗还是环境灾难将在接下来的1 000年中的某一时刻使地球瘫痪，1 000年用地质年代衡量只是眨眼瞬间。在此之前，我希望并相信，我们的智巧的种族将会找到一种方法，摆脱地球险恶的羁绊，并在灾害后幸存下来。当然栖居在地球上的数百万其他物种可能做不到，这将使我们作为整个种族而良心不安。

我认为我们正不顾危险地冷漠对待自己在地球上的未来。目前，我们无处可去，但从长远来看，人类不应该把所有的鸡蛋放在一个篮子里，或者放在一个行星上。我希望在学会如何逃离地球之前，能避免篮子摔下。但我们天生就是探险家，受着好奇心的激励。这是一种独特的人类素质。正是这种驱动的好奇心让探险家们发现地球不是平坦的，而正是同样的天性将我们在想象中瞬刻送到恒星，促使我们要实际去那里。每当我们进行一次新的大飞跃，例如登月，我们就会提升人性，将个人与民族团结在一起，开始引领新的发现和新技术。离开地球需要协调一致的全球手段——每个人都应该参与。我们需要重新点燃20世纪60年代早期太空旅行的激情。这项技术几乎快被我们掌握在手中。现在是探索其他太阳系的时候了。到太空去可能是唯一可以从我们自己制造的灾难中自我拯救的办法。我确信人类需要离开地球。如果我们留下来，就有被歼灭的危险。



那么，除了我对太空探索的希望之外，未来会是什么样子的，以及科学可以如何帮助我们呢？

在诸如《星际迷航》的科幻系列中展示了未来科学的流行图景。《星际迷航》的制作人甚至说服我参加，这并没有那么难。

那次出演非常有趣，不过我之所以说到它是为了提出一个严肃的观点。从H.G.韦尔斯开始，给我们展现的所有的未来场景几乎基本上都是静态的。它们展示了一个科学、技术和政治组织在大多数情况下远比我们先进的社会。（最后这点也许并不困难。）从现在到那时必将发生许多伟大的变化，并伴随着紧张和不安。但是，到我们出现在未来时，科学、技术和社会组织预期会达到一个近乎完美的水平。

我质疑这个图景，并询问我们是否会到达科学技术的最终稳定的状态。自上次冰河时期以来的一万年左右的时间里，人类从未处于恒定知识和固定技术的状态。历史上有过一些挫折，诸如在罗马帝国崩溃之后，我们曾经称为黑暗时代一样。但世界人口，作为衡量我们保持生命并养活自己的技术能力的标准一直在稳步上升，其中伴随着诸如黑死病时期的短暂停顿。在过去的200年里增长有时呈指数式——世界人口从10亿跃升至约76亿。在近代，技术发展的其他测度是电力消耗或科学文章的数量。它们也表现出近指数增长。的确，我们现在的期望值非常高，某些人甚至感到被政客和科学家所欺骗，因为我们尚未达到未来的乌托邦远景。例如，电影《2001：太空漫游》向我们展示了一个月球基地并发射了一个载着男人，或者我应该说，载人的到木星的飞行器。

没有任何迹象表明科学和技术发展在不久的将来会急剧减缓和停止。到《星际迷航》的时刻肯定不会，那距离我们只有350年左右。但在下一个千年不可能继续目前的增长率。到2600年，世界人口密度将达到擦肩摩踵的程度，电力消耗将使地球焕发红热。如果你把正在出版的新书叠加在一起，按照目前的生产速度，你必须以每小时90英里的速度运动才能恰好跟上书列的末端。当然，到2600年，新的艺术和科学工作将以电子形式出现，而不是实物的书籍和论文。尽管如此，如果指数增长继续下去，我这一类的理论物理学将会每秒出10篇论文，人们根本没有时间阅读它们。

很清楚，目前的指数增长不能无限期地持续下去。那将会发生什么？一种可能性是，我们将通过诸如核战争之类的灾难来消灭自己。即

使我们不完全摧毁自己，我们也有可能会陷入残酷和野蛮的状态，就像《终结者》的开场。

我们在下一个千年将如何发展科学和技术？这很难回答。但是，让我冒险为未来提出我的预测。关于下一个百年我还有一些机会预测成功，但千年的其余部分将是疯狂的猜测。

我们对科学的现代理解大约始于欧洲人到北美定居的时期，而到19世纪末，似乎我们即将完成根据现在被称为经典定律对宇宙的理解。但是，正如我们见到的，在20世纪，人们开始观察到，能量以称为量子的离散的包的形式出现，而马克斯·普朗克和其他人表述了一种称为量子力学的新理论。这呈现了一幅完全不同的现实图景，在该图景中，事物不具有一个独特的历史，但拥有每种可能的历史以及各自的概率。当人们研究到单个粒子时，粒子的可能历史必须包括那些旅行得比光更快，甚至可以在时间中返回的路径。然而，这些在时间中回溯的路径不仅像天使在别针上跳舞一样，他们还有真实的观察后果。甚至我们以为空虚的空间也充满了在空间和时间中的闭环上运动的粒子。也就是说，在循环的一侧它们在时间中向前运动，而在另一侧在时间中向后运动。

尴尬的是，因为在空间和时间中有无数个点，所以有无数个可能的闭合粒子环。而无数个闭合的粒子环将具有无限的能量，并且将空间和时间卷曲到单个点。甚至连科幻小说都没有想到像这样怪异的东西。处理这种无限的能量需要一些非常有创见的策略，过去20年间理论物理学的大部分工作一直在寻找一种理论，在这种理论中，空间和时间的无限数量的闭环完全相互抵消。只有这样，我们才能将量子理论与爱因斯坦广义相对论统一起来，并获得宇宙基本定律的一个完备理论。

我们会在下一个千年发现这一完备理论的前景如何，我愿说前景非常好，不过我是一个乐观主义者。1980年，我说我认为在接下来的20年里我们有50%的机会发现一个完备的统一理论。自那时以来，我们在这一时期取得了一些显著的进步，但最终的理论看起来差不多还是这么远。我们将永远也够不着物理学的圣杯吗？我不这么认为。

在20世纪初，我们理解在经典物理尺度上的自然的行为，也就是说，经典物理到大约百分之一毫米时仍然成立。20世纪前30年关于原子物理学的研究使我们能理解低至百万分之一毫米的长度。从那以后，核能和高能物理学的研究把我们带到了十亿分之一的更小长度尺度。似乎

我们可以永远继续下去，发现越来越小长度尺度的结构。但是，这个系列有一个极限，正如一系列嵌套的俄罗斯娃娃。最终得到一个最小的娃娃，就再也不能拆开。在物理学中，最小的玩偶被称为普朗克长度，是一毫米除以一亿亿亿亿。我们不打算建立可以探测那么小距离的粒子加速器。它们必须比太阳系还大，而且在目前的财政环境下，它们不太可能获得批准。但是，我们理论的一些推论，可以通过更适度得多的机器来检测。

在实验室里不可能探测到普朗克长度，虽然我们可以研究大爆炸以获得比我们在地球上能达到的更高的能量下和更短的长度尺度的观察证据。然而，在很大程度上，我们必须依靠数学美和一致性来找到万物的终极理论。

鉴于我们对制约宇宙的基本定律的了解，我们有可能会实现《星际迷航》那种先进但基本上静态水平的未来远景。但我认为我们在使用这些定律时永远不会达到稳定状态。终极理论不会对我们可以产生的系统的复杂性施加任何限制，而且我认为下一个千年的最重要的发展正是在这种复杂性中。



到目前为止，我们拥有的最复杂的系统是我们自己的身体。生命似乎起源于40亿年前覆盖地球的原始海洋。我们不知道这是怎么发生的。可能是原子之间的随机碰撞构建了高分子，这些高分子可以自我复制并将它们自身组装成更复杂的结构。我们确切知道的是，在35亿年前，出现了高度复杂的分子DNA。DNA是地球上所有生命的基础。它有一个双螺旋结构，就像一个螺旋楼梯，这是由弗朗西斯·克里克和詹姆斯·沃森于1953年在剑桥卡文迪什实验室发现的。双螺旋的两条链通过核酸的碱基对连接，就像螺旋楼梯的踏板。有四类核酸，其碱基分别是胞嘧啶、鸟嘌呤、腺嘌呤和胸腺嘧啶。不同的核酸沿螺旋楼梯的顺序携带遗传信息，这使DNA分子能够组装它周围的有机体并自我繁殖。当DNA制作自己的副本时偶尔也会将沿着螺旋的核酸顺序弄错。在大多数情况下，复制中的错误都会使DNA无法自我繁殖，这种遗传错误，或者称为突变，

将会消亡。但在一些情况下，错误或突变会增加DNA存活和繁殖的机会，从而核酸序列中的信息内容会逐渐演化并增加复杂性。另一位剑桥人，查尔斯·达尔文于1858年首先提出了这种突变的自然选择，虽然他不知道它的机制。

因为生物进化基本上是在所有遗传可能性的空间中的随机行走，它一直非常缓慢。在DNA中编码的信息的复杂性或比特数，大致取决于分子中的核酸数量。每一比特信息可以被认为是对一个是/非问题的答案。在最早的20亿年左右的复杂性的增加率应是大约每百年一比特信息。过去几百万年DNA复杂性的增加率逐渐上升到约一年一比特。但现在我们正处于一个新时代的开端，我们可以不必等待生物进化的缓慢过程而增加我们DNA的复杂性。在过去的一万年里人类DNA的变化相对较小。但我们很可能在下一个千年间完全重新设计它。当然，很多人会说必须禁止对人类实施遗传工程。但我宁愿怀疑他们是否能够阻止住。由于经济原因对植物和动物进行基因编辑能被允许，有人肯定会对人类进行尝试。除非我们拥有极权世界秩序，否则有人定会在某处设计出改良的人种。

显然，相对于未经改善的人种，发展改良的人种将引起巨大的社会和政治问题。我并非提倡人类遗传工程，也不认为它是一件好事，我只是说无论我们是否想要，它都可能在下一个千年发生。这就是为什么我不相信像《星际迷航》的科幻，那里面的未来350年后的人基本没变。我认为人类，还有它的DNA，将非常迅速地增加其复杂性。

在某种程度上，如果人类要应对周围日益复杂的世界，并迎接诸如太空旅行等新挑战，它就需要改善其心理和身体素质。如果生物系统要保持领先于电子系统，它还需要增加其复杂性。目前，电脑具有速度优势，但它们没有任何智能迹象。这并不奇怪，因为我们目前的电脑不如蚯蚓的大脑那么复杂，蚯蚓是一个不以其智力而闻名的物种。但电脑大致遵循摩尔定律的一个版本，该定律说，它们的速度和复杂性每18个月翻一番。这是指数增长之一，显然不能无限期地持续下去，事实上它已经开始放缓。然而，快速的改进步伐可能会持续到电脑拥有与人类大脑相似的复杂性。有人说，无论可能变成什么样子，电脑都无法显示出真正的智能。但在我看来，如果非常复杂的化学分子可以在人体中运行使得他们变得聪明，那么同样复杂的电子电路也能使电脑以智能方式运行。而如果它们是智能的，它们可能会设计出更具复杂性和智能的电

脑。

这就是为什么我不相信科幻中一个先进但固定的未来的图景。相反的，我预期无论在生物还是电子领域复杂性都迅速增长。这在未来100年内不会发生太多，这就是我们所有人能够可靠地预测的。但到下一个千年结束时，如果我们那时还存活，这种变化将是根本性的。

林肯·斯蒂芬斯曾经说过：“我已经看到了未来，它确实有效。”他实际上是在谈论苏联，我们现在知道它根本行不通。尽管如此，我认为目前的世界秩序还是会有一个未来，但它会相当不同。



什么是对这个星球未来的最大威胁？

“小行星碰撞将成为我们无法防御的威胁。不过最近一次这样的小行星碰撞大约发生于6 600万年前，并导致恐龙灭绝。更紧迫的危险是气候变化失控。海洋温度升高会使冰盖融化并导致大量二氧化碳释放。这两种效应都可以使我们的气候变得像金星一样，但温度达到250摄氏度。”

8 Should we colonise space？
我们应去太空殖民吗？

我们为什么要进入太空？花费那么多努力和金钱就为了获得一些月球岩石的正当理由是什么？难道在地球上没有更好的事业吗？显而易见的答案是因为它一直在我们周围。不离开地球就像在荒岛上不想逃生的漂流者一样。我们需要探索太阳系，找到人类可以居住的地方。

在某种程度上，这情况就像1492年之前的欧洲一样。人们可能会认为让哥伦布出发而徒然无功是浪费金钱。然而，新世界的发现对旧世界产生了深远的改变。试想一下，如果那没有发生的话，我们将吃不到巨无霸或肯德基。向太空扩散将产生更大的效应。它将彻底改变人类的未来，并可能决定我们究竟是否拥有任何未来。它不会解决我们在地球上的任何直接问题，但它会给我们一个新的视角，让我们向外而不是向内看。但愿它会将我们团结起来去面对共同的挑战。

这将是一个长期的战略，我的意思是，这个长期时间是数百年甚至数千年。我们在30年内可以在月球上建一个基地，50年内到达火星，200年内探索外行星的卫星。所谓的到达，我的意思是指载人的航天器。我们已经在火星上运行漫游器，并让探测器着陆土星的卫星泰坦上，但如果我们正在考虑人类的未来，我们就得自己去那里。

进入太空绝不便宜，但它只需要世界资源的一小部分。自从阿波罗登陆以来，NASA的预算考虑到物价因素实际上基本保持不变，但它从1970年占美国GDP的0.3%下降到2017年约为0.1%。即使要认真地努力进入太空，我们得增加国际预算20倍，也还只占世界GDP的一小部分。

也许有人认为更应该用我们的钱来解决这个星球的问题，例如气候变化和污染，而不是浪费它去寻找一颗新行星却可能毫无结果。我并不否认应对气候变化和全球变暖的重要性，但我们可以在做到这一点之余，仍然将世界GDP的0 .25%用于太空。难道我们的未来不值百分之一的四分之一吗？

在20世纪60年代，我们认为，太空探索值得付出巨大努力。1962年，肯尼迪总统承诺美国将在10年内登陆月球。1969年7月20日，巴兹·

奥尔德林和尼尔·阿姆斯特朗降落在月球表面。它改变了人类的未来。我当时27岁，是剑桥大学的一名研究员，我错过了它。我正在利物浦参加一个关于奇点的会议。登陆发生的那个时刻，我正在听取雷内·托姆关于突变论的演讲。那时还没有回放电视，我们也没有电视机，但是我两岁的儿子向我描述了他看到的登月直播。

太空竞赛有助于产生对科学的迷恋并加速我们的技术进步。今天的许多科学家就是受到登月的感染而进入科学领域的，他们的志向是更多地了解我们自己和我们在宇宙中的位置。它给了我们关于我们世界的新观点，促使我们将整个星球视为一个整体。然而，在1972年的最后一次登月之后，由于没有进一步载人航天飞行的未来计划，公众对太空的兴趣减弱了。在西方，这伴随着对科学的普遍失望，因为虽然它带来了巨大的好处，但并未解决日益占据公众注意力的社会问题。

一般而言，一个新的载人航天飞行计划可以大力恢复公众对太空和科学的热情。机器人任务要便宜得多，并提供更多的科学信息，但它们没有摄住公众想象力的同等能力。它们没把人类传播到太空中去，我得争辩说这才是我们的长期战略。在2050年前建立月球基地，以及在2070年前达到载人登陆火星的目标，将重新启动太空计划，并带来一种目的感，就像在20世纪60年代肯尼迪总统的月球计划一样。在2017年底，埃隆·马斯克宣布SpaceX计划在2022年前建造一个月球基地并完成火星任务，而特朗普总统签署了太空政策指令让NASA重新集中进行探索和发现，所以我们也许会更早实现目标。

对太空的新兴趣也会普遍地提高科学在公众心目中的地位。科学和科学家们没有得到足够尊重而正在产生严重的后果。我们生活在一个越来越受科学技术支配的社会，但越来越少的年轻人想进入科学领域。一个新的雄心勃勃的太空计划会让年轻人兴奋不已，激励他们进入广泛的科学领域，不仅仅是天体物理学和太空科学。

对我来说也是如此。我一直梦想着太空飞行。但是这么多年来我一直认为这只是一个梦想。被限制在地球和轮椅上，除了通过想象力和理论物理学方面的研究，我怎么能体验到太空的壮丽。我从未想过，我会有机会从太空俯瞰我们美丽的星球，或者凝视宇宙更远的无限。这是宇航员的王国，他们是幸运的少数人，可以体验太空飞行的奇妙和刺激。不过，我还没有考虑到那些负有使命迈出地球外冒险第一步的人的能量和热情。而在2007年，我很幸运能够进行零重力飞行并首次体验失重。

它只持续了4分钟，但简直棒极了。但愿我可以一直继续下去。

当时有人引用我的话说，如果我们不进入太空，我担心人类将不会有未来。我当时相信，我现在仍然相信。我希望我能证明任何人都可以参加太空旅行。我相信，像我这样的科学家和创新的商业企业家应该尽其所能来促进太空旅行。

但人类可以长时间离开地球生存吗？我们在国际空间站的经验表明，人类能远离地球生存数月。然而，轨道的零重力导致几个不良生理变化，包括骨头弱化，以及引起与液体相关的一些实际问题等。因此，人们需要在行星或卫星上为人类建立长期基地。通过挖掘表面，人们会获得隔热，并防止流星和宇宙射线。如果外星社区要独立于地球自我维持的话，行星或卫星也可以作为需要的原材料的来源。

太阳系中哪里是人类可能的殖民之处？最明显的是月球。它很接近地球并且相对容易到达。我们已经在上面降落过，并在月面驾驶过越野车。另一方面，月球很小，不像我们地球，它没有大气，也没有用于偏转太阳辐射粒子的磁场。那里没有液态水，尽管在北极和南极陨石坑中可能有冰。月球上的殖民地可以将冰作为氧气来源，由核能或太阳能板提供电力。月球可以成为前往太阳系其他地方的基地。

很明显，火星是下一个目标。它距离太阳是地球距离太阳的1.5倍，所以接收了一半温暖。它曾经有一个磁场，但在40亿年前衰退了，使火星赤裸裸地暴露在太阳辐射下。这剥夺了火星的大部分大气层，只留下了地球大气的1%的压力。然而，它过去的压力肯定会更高，因为我们看到了似乎是径流通道和干涸湖泊的东西。现在火星表面不能存在液态水。它会在近真空中蒸发。这表明火星有过一个温暖湿润的时期，在此期间可能出现过生命，无论是自发产生还是通过胚种论（即从宇宙中的其他地方带来）。现在火星上没有生命迹象，但如果我们发现生命曾经存在的证据，这就表明在一个合适的星球上发生生命的可能性相当高。但是，我们必须小心，我们不要让来自地球的生命沾染火星，引起混淆问题。同样，我们必须非常小心，不要带回任何火星生命。我们对它没有抵抗力，它可能会消灭地球上的生命。

从1964年发射水手4号开始，NASA向火星发射了大量宇宙飞船。它曾用一些轨道飞行器调查了该行星，最新的是火星勘测轨道飞行器。这些轨道探测器发现了深谷和太阳系中最高的山脉。NASA的一些探测器

在火星表面登陆，最近还有两个火星漫游器登陆。它们已经发回干燥沙漠的景观照片。就像在月球上一样，水和氧气也可能从极地冰中获得。火星上有火山活动。这会把矿物质和金属带到地表，可供殖民地使用。

月球和火星是太阳系中建立太空殖民地最适合的地方。水星和金星太热了，而木星和土星是气体巨物，没有坚固的表面。火星的卫星非常小，而且不比火星本身更有优势。一些木星和土星的卫星也许是可能的。木星的卫星欧罗巴有冻冰的表面。但是表面下可能有液态水，生命也许可能在那里发展了。我们怎么知道？我们必须降落在欧罗巴上并钻一个洞吗？

土星的卫星泰坦，无论体积还是质量，都较我们的月球大一些，并具有密集的大气。NASA和欧洲航天局的卡西尼-惠更斯号任务已使探测器在泰坦上着陆，并发回其表面的照片。但是，它非常冷，远离太阳，我也不喜欢住在液态甲烷湖边。

不过如何大胆地超越太阳系呢？我们的观察表明，很大一部分恒星周围有环绕的行星。到目前为止，我们只能检测到如木星和土星那样的巨行星，但可以合理地假设它们会伴随有较小的类地行星。其中一些将位于金凤花区，那里与恒星的距离在适当的范围内，允许液态水存在于其表面。在距离地球30光年内大约有1 000颗恒星。如果其中1%拥有地球大小并在金凤花区的行星，我们就有10个候选的新世界。

以比邻星-b为例。这颗系外行星距离地球最近，但仍距地球4.24光年，围绕着在半人马座阿尔法星恒星系中的恒星比邻星公转，最近的研究表明它与地球有一些相似之处。

采用今天的技术前往这些候选世界也许不可能，但凭我们的想象力，我们可以使星际旅行成为在未来200年到500年间的长期目标。我们发送火箭的速度取决于两个因素：排气的速度和火箭在加速时失去的质量比。化学火箭的排气速度，就像我们迄今使用的那样，每秒约3千米。通过抛弃其质量的30%，它们可以获得每秒约500米的速度，然后再次减速。根据NASA的报告，到达火星只需要260天，误差正负10天，而美国宇航局的一些科学家预测只需130天。但要到达最近的恒星系统则需要300万年。要走得更快就需要比化学火箭所能提供的快得多的排气速度，那就是光本身的速度。发自尾部的强大的光束可以推动宇宙飞船前进。核聚变可以提供宇宙飞船1%质量的能量，该能量可将飞船加速

到十分之一的光速。超过这个，我们要么需要物质-反物质的湮灭，要么是某种完全新型的能量。事实上，到半人马座阿尔法星的距离是如此巨大，要在人的一生中到达那里，宇宙飞船将不得不携带大约等于银河系中所有恒星的质量的燃料。换句话说，凭当前技术星际旅行是完全不切实际的。半人马座阿尔法星永远不会成为度假胜地。

感谢想象力和聪明才智，我们有机会改变这种状况。2016年，我加入了企业家尤里·米尔纳推出的“突破摄星”，这是旨在使星际旅行成为现实的长期研发计划。如果我们成功，在今天活着的人的一生中，我们将向半人马座阿尔法星发送探测器。不过我会很快再说这些。

我们如何开始这段旅程？到目前为止，我们的探索仅限于我们局域的宇宙邻里。过去40年，我们最无畏的探险家——旅行者号——刚刚进入星际太空。它的速度，每秒11英里，意味着它需要大约7万年才能到达半人马座阿尔法星。这个星座距离我们4 .37光年、25万亿英里。如果今天半人马座阿尔法星上有生命存在，他们仍然对唐纳德·特朗普的崛起快乐得一无所知。

很清楚，我们正进入一个新的太空时代。第一批私人宇航员将成为先锋，第一批航行将非常昂贵。但我的希望是，随着时间的推移，更多的地球人可承受得起太空飞行。将越来越多的乘客带入太空，将为我们在地球上的地位和作为其管家的责任带来新的意义，它将帮助我们认识到我们在宇宙中的地位和未来。这就是我相信的我们终极命运之所在。

“突破摄星”是人类初访外太空的真正机会，它旨在探索和权衡殖民化的可能性。这是一个概念验证任务，它涉及三个概念：小型化航天器、光推进和锁相激光器。恒星芯片是一种功能齐全的太空探测器，尺寸缩小到几厘米，将安装在光帆上。光帆由特异材料制成，重量不超过几克。据设想，1000个恒星芯片和光帆，即纳米飞船，将被送入轨道。在地面上，1千米规模的激光器阵列将组合成一个非常强大的光束。光束射穿大气，以几十吉瓦的功率撞击太空中的这些光帆。

就像爱因斯坦在16岁时梦想骑在光束上那样，这项创新背后的理念是纳米飞船骑在光束上。不完全是光的速度，但到了它的五分之一，或每小时1亿英里。这样的系统可在短于1小时内到达火星，几天内到达冥王星，一周之内掠过旅行者号探测器，只用20年多一点时间就到达半人马座阿尔法星。一旦到达那里，纳米飞船可以对在系统中发现的任何行

星拍照，检测磁场和有机分子，并将数据用另一个激光束发回地球。早先用来传送发射光束的同一阵列的碟会接收到这个微小的信号，估计返回大约需要4年时间。重要的是，恒星芯片的轨迹可能包括掠过比邻星-b。它是具有地球尺度的行星，并处于半人马座阿尔法星中的主星的可居住区域。2017年，“突破摄星”和欧洲南方天文台合作进一步寻找半人马座阿尔法星的可居住行星。

“突破摄星”有次要目标，它将探索太阳系并查明穿过围绕太阳的地球轨道的小行星。此外，德国物理学家克劳迪乌斯·格罗斯提出，这种技术也可以用来在本来只可短暂居住的系外行星建立一个单细胞微生物的生物圈。

到目前为止，这都是能做到的。然而，存在重大挑战。1吉瓦功率的激光器只提供几牛顿的推力。但纳米飞船通过只有几克的质量来弥补这一点。工程上的挑战是巨大的。该纳米飞船必须能经受极端加速、寒冷、真空和质子，以及与诸如太空尘埃垃圾的碰撞。另外，由于大气湍流，一组激光器将总计100吉瓦的功率聚焦到太阳帆上非常困难。我们如何组合数百个激光器通过大气层的运动，我们如何推动纳米飞船而避免将它们焚烧，又如何把它们瞄准在正确的方向？然后我们需要保持纳米飞船在冰冷的虚空中运作20年，这样它们才能穿越4光年往回发送信号。但这些都是工程问题，而工程师的挑战最终都趋向于得到解决。随着它进步为成熟的技术，可以拟想其他令人兴奋的任务。即使使用功率较弱的激光阵列，飞到其他行星、外太阳系或星际空间的旅程时间也可被大大缩短。

当然，这还不是人类星际旅行，即使被扩展到载人飞船也还不算。因为它将无法停住。不过，人类文化成为星际文化的时刻，就是我们终于接触银河系的时刻。而如果“突破摄星”发回一个环绕我们最近邻恒星公转的可居住行星的图像，它可能对人类的未来具有极大的重要性。

最后我还要回到爱因斯坦。如果我们在半人马座阿尔法星系统中找到一颗行星，一个以五分之一光速行进的相机拍摄到它的图像，那么由于狭义相对论的效应图像会略微失真。这将是航天器首次飞得足够快得以观察到这种效应。事实上，爱因斯坦理论是整个使命的核心。没有它，我们既没有激光，也没有能力进行以五分之一光速超过25万亿英里导航、成像和数据传输所需的计算。

我们可以看到在这个16岁男孩梦想骑在光束上和我们自己的梦想之间的路径，我们正计划将其变成现实，骑着自己的光束抵达恒星。我们正站在新时代的门槛上。人类到其他行星上殖民不再是科学幻想。这会变成科学事实。人类作为一个单独的物种存在了大约200万年。文明始于大约1万年前，并且发展速度一直在稳步增长。如果人类要再继续下去100万年，我们的未来就要大胆前进到之前无人去过的地方。

我希望是好的。我不得不如此。我们别无选择。



民用太空旅行的时代即将来临。
您认为这对我们意味着什么？

“我期待太空旅行。我愿意是首批购票人之一。我期望在未来100年内，我们将能够在太阳系中的任何地方旅行，也许除了外行星。但要到恒星旅行则需要更长的时间。我估计在500年后，我们将访问一些附近的恒星。它不像《星际迷航》那样。我们不能以曲速旅行。所以往返至少需要10年，也可能要长得多。”

9 Will artifcial intelligence outsmart us？人工智能会不会超过我们？

智力是人之为人的核心。文明所提供的一切都是人类智慧的产物。

DNA传递代际的生命蓝图。愈加复杂的生命形式从眼睛和耳朵等传感器输入信息，在大脑或其他系统中处理信息，决定如何行动，然后向譬如肌肉等输出信息以作用于外界。在我们138亿年的宇宙历史中的某个时刻，发生了一件美妙的事。这种信息处理变得如此聪明，以使生命获得意识。我们的宇宙现在已经醒来，意识到自己。微末如星尘的我们，居然对我们生活于其中的宇宙有了如此详细的了解，我认为这是一个胜利。

我认为蚯蚓的大脑运作与电脑计算之间没有显著差异。我还相信进化意味着，在蚯蚓和人类的大脑之间不存在质的差异。因此，电脑原则上可以模仿人类智慧，甚至更好。某些东西获得比其祖先更高智力显然是可能的：我们演化得比我们的猿类祖先更聪明，而爱因斯坦比他的父母聪明。

如果电脑继续遵守摩尔定律，它们的速度和记忆容量每18个月加倍，结果是在接下来的100年的某个时刻电脑很可能在智力上超过人类。当人工智能（AI）在AI设计中变得比人类做得更好，这样它可以在无人帮助的情况下以递归的方式改善自己，我们就可能会面临智力爆炸，最终导致机器在智力上超过我们更甚于我们超过蜗牛。当那种情形发生时，我们需要确保计算机的目标与我们的目标相互一致。人们也许会轻率地将高智能机器的概念斥为只不过是科学幻想，但这可能是一个错误，还可能是我们最糟糕的错误。

在过去的20多年里，人工智能一直专注围绕制造智能代理人的问题，那是在特定环境中感知和行动的系统。在这种情况下，智能与理性的统计和经济概念有关。通俗地讲，也就是做出好的决策、计划或推论的能力。由于这项最近的工作，人工智能、机器学习、统计学、控制理论、神经科学和其他领域之间形成了很大程度的整合和交叉。共享理论框架的建立，结合数据和处理能力，在各种组件任务中取得了显著的成

功，例如语音识别、图像分类、自动驾驶车辆、机器翻译、腿式运动和问答系统。

随着在这些领域和其他领域中从实验室研究转向经济上有价值的技术发展，良性循环也在演进，即使性能上的微小改进也值得花大笔资金，从而促进了对研究更进一步的投入。当今一个广泛共识是，人工智能研究正在稳步发展，其对社会的影响可能会增加。潜在的好处是巨大的，我们无法预测当AI可能提供的工具放大这种智能时，我们会获得什么。彻底消除疾病和贫困是可能的。由于AI的巨大潜力，重要的是研究如何在避免潜在陷阱的同时获得收益。创建AI的成功将是人类历史上的最大事件。

不幸的是，它可能也是最后一个，除非我们学会如何规避风险。将AI用作工具包可以增强我们现有的智能，在科学和社会的每个领域开拓进步。但是，它也会带来危险。到目前为止开发的原始形式的人工智能被证明非常有用，我却害怕创造出匹配或超越人类的某种东西的后果。我担心的是，AI会自己起飞并不断加速重新设计自己。人类受到缓慢的生物进化的限制，无法竞争，将会被超越。在未来，AI可以发展自身的意志，那是一种与我们相冲突的意志。其他人相信人类可以在相当长的一段时间控制技术的速度，让AI实现解决许多世界问题的潜力。对此，我还不是这么确定，虽然众所周知，关于人类，我是一个乐观主义者。

例如，在短期内，世界军事力量正在考虑开始自动武器系统的军备竞赛，该系统可以选择和消除他们自己的目标。虽然联合国正在辩论将禁止这种武器的条约，自动武器支持者通常忘了问最重要的问题。军备竞赛的可能终点是什么，那是人类想要的吗？我们真的希望廉价的人工智能武器成为明天的卡拉什尼科夫冲锋枪，卖给黑市上的罪犯和恐怖分子吗？考虑到我们对越发先进的人工智能系统实行长期控制的能力，我们是否应该武装他们并将我们的防御交给他们？2010年，电脑化的交易系统创造了股票市场的闪电崩盘；电脑触发的防御领域崩溃会是什么样子？现在是停止自动武器军备竞赛的最佳时机。

从中期来看，人工智能可以使我们的工作自动化，带来巨大繁荣和平等。更长远地看，我们对于可以实现的事情没有根本的限制。没有任何物理定律可以排除比以人脑中的粒子排列更高级的计算方式组织粒子的方法。爆炸式过渡是可能的，但它的结局可能与电影不同。正如数学家欧文·约翰·古德在1965年意识到的那样，在科幻作家维纳尔·维格称之

为技术奇点之处，具有超人智慧的机器甚至可以进一步重复改进他们的设计。人们可以想象这样的技术胜过金融市场，发明超过人类研究人员，操纵超过人类领导者，并甚至可能用我们无法理解的武器制服我们。而AI短期对我们的影响取决于谁控制它，长期影响取决于它究竟是否可能被控制。

总之，对于人类，超级智能的问世是有史以来要么最好要么最坏的事。人工智能的真正风险不是恶意，而是能力。一个超级聪明的AI会非常擅长实现目标，如果这些目标和我们的不一致，我们就遇到了麻烦。你可能不是蚂蚁邪恶的仇敌，会去恶意踩踏它们，但如果你负责水力发电的绿色能源项目，而在该地区有一个蚁丘要被淹掉，对于蚂蚁那就太糟糕了。不要将人类置于那些蚂蚁的境地。我们应该提前计划。如果一个先进的外星人文明给我们发短信说，“我们几十年后到达”，我们会不会就回复“行，当你到了这里给我们打电话，我们会开灯欢迎”呢？大概不会，但这或多或少正是我们在对付AI时所做的。除了一些小的非营利性机构之外，很少有人致力于这些严肃的研究。

幸运的是，现在正在发生变化。技术开拓者比尔·盖茨、史蒂夫·沃兹尼亚克和埃隆·马斯克回应了我的担忧，而一种健康的风险评估文化和对社会影响的认识开始在AI社区扎根。2015年1月，我和埃隆·马斯克以及许多AI专家，签署了一份关于人工智能的公开信，呼吁认真研究其对社会的影响。在过去，埃隆·马斯克警告说，超人类人工智能能够提供无法估量的好处，但如果不谨慎地部署，将对人类产生不利影响。他和我是生命未来研究所的科学顾问委员会成员，该研究所致力于减轻人类面临的存在的风险，我们起草了该公开信。该信要求具体研究在获得AI为我们提供潜在好处的同时，如何能够预防潜在问题，并且旨在让AI研究人员和开发人员更加关注AI安全性。此外，对于政策制定者和公众来说，这封信是想提供信息而不是危言耸听。我们认为非常重要的是，每个人都知道AI研究人员正在认真考虑这些担忧和道德问题。例如，人工智能具有根除疾病和贫困的潜力，但研究人员必须努力创造可以控制的人工智能。

2016年10月，我在剑桥还创立了一个新中心，该中心将尝试解决人工智能研究快速发展所带来的一些开放式问题。利弗休姆智能未来中心是一个多学科研究所，致力于研究智力的未来，这对我们的文明和物种的未来至关重要。我们花了很多时间研究历史，我们得承认，主要是愚

蠢的历史。现在人们正在转去研究智能的未来，这是受欢迎的改变。我们意识到了这种潜在危险，但也许利用这种新技术革命的工具，我们甚至可以去除工业化对自然界造成的一些破坏。

人工智能发展的最新进展包括欧洲议会呼吁起草一套管理创造机器人和AI的法规。有点令人惊讶的是，这包括电子人格的一种形式，旨在确保最有能力和最先进的AI的权利和责任。一个欧洲议会发言人评论说，随着我们日常生活中越来越多的领域受到机器人的影响，我们需要确保机器人正在并将继续为人类服务。一份提交给议会的报告宣称世界正处于新的工业机器人革命的前沿。它审查是否允许赋予机器人作为电子人，具有与公司人格的法律定义同等的合法权利。但它强调在任何时候研究人员和设计师都应确保所有机器人设计配有一个终结开关。

在斯坦利·库布里克的科幻片《2001：太空漫游》中，太空船上载有发生故障的机器人电脑哈尔，这对船上的科学家们没有什么帮助，但那是虚构的。我们针对事实。在报告中，奥斯本·克拉克多国律师事务所的顾问罗那·布拉泽尔说，我们没赋予鲸鱼和大猩猩人格，所以没有必要急于赋予机器人人格。但是要警惕。该报告承认，在几十年内，人工智能可能超越人类的智力，并挑战人类-机器人关系。

到2025年，将有大约30个特大城市，每个城市拥有超过1 000万的居民。当所有人都吵着要求为他们随时提供商品和服务，技术能否帮助我们，跟上我们对即时商务的渴望？机器人肯定会加速在线零售流程。但要彻底改变购物行为，它们需要足够快，以便在每个订单上实现当日交货。

与世界互动的机会正在迅速增加，而不必亲自到场。你可以想象，我觉得这很有吸引力，尤其是因为我们所有人的城市生活都如此繁忙。多少次你希望有替身可以分担你的工作量？为我们自己创造现实的数字代理人是一个雄心勃勃的梦想，但最新的技术表明它可能不像听起来那么匪夷所思。

当我年轻时，技术的兴起似乎提示，我们将来都将享受更多的休闲时光。但事实上，我们越能干，我们就越忙。我们的城市已经充满扩展我们能力的机器，但如果我们可以同时在两个地方该多厉害？我们习惯于在电话系统和公告上使用自动语音。现在发明家丹尼尔·克拉夫特正在探究我们如何在视觉上复制自己。问题是，替身有多逼真？

互动导师可能对大规模开设在线课程（MOOCs）和娱乐有用。这真的很令人兴奋。电子数字演员会永远年轻，能够表现人类不可能胜任的技能。我们未来的偶像甚至可以不是真实的。

我们如何与数字世界联系是我们将来取得进展的关键。在最聪明的城市，最聪明的家庭将配备如此有灵犀的设备，它们几乎可以毫不费力地与人进行互动。

当打字机被发明时，它变革了我们与机器互动的方式。将近150年后，触摸屏幕已经开启了与数字世界新的沟通方式。最近的AI里程碑，比如自驾汽车，或电脑赢得围棋赛，预示了即将发生的事物。巨大投资正在涌入这项技术，它已经成为我们生活的重要组成部分。未来几十年，它将渗透到我们社会的每个方面，包括医疗、工作、教育和科学等许多领域，为我们提供聪明的帮助和建议。我们迄今所看到的成就，和未来几十年将会带来的相比，肯定是微小的，我们也无法预测，当人工智能扩展了我们自己的思维后，我们可能会取得的成就。

也许借助这种新技术革命的工具，我们可以使人类生活更美好。例如，研究人员正在开发有助于脊髓损伤患者瘫痪逆转的AI。运用硅芯片植入以及在大脑与身体之间的无线电子接合，该技术会允许人们用自己的意念去控制自己的身体动作。

我相信大脑和电脑连接是未来的交流方式。有两种方法，电极接通头骨和移植物。第一个就像透过磨砂玻璃看不太清楚，第二个更好，但有感染风险。如果我们可以将人脑连接到互联网，它就会将整个维基百科都作为其资源。

随着人、设备和信息越来越紧密相互连接，世界甚至变化得更快。计算能力正在增长，量子计算正在迅速实现。这将以指数方式的更快速度革新人工智能，它将推进加密。量子电脑将改变一切，甚至人类生物学。

已经有一种精确编辑DNA的技术，称为CRISPR。这种基因组编辑技术的基础是细菌防御系统。它可以准确地定位和编辑遗传密码的片断。遗传操作的最佳目的是修改基因可以让科学家通过纠正基因突变来治疗遗传疾病。然而，还可能存在操纵DNA的不怎么高尚的动机。我们在基因工程方面走多远将成为一个日益迫切的问题。我们如果无视基因工程

的危险，就绝无可能治疗运动神经元疾病，比如我的ALS。

智力被定性为适应变化的能力。人类智慧是能够适应环境变化的人经世代自然选择的结果。我们不应害怕改变。我们需要让它对我们有利。

我们所有人都可以发挥作用，确保我们和下一代不仅有机会，而且立志尽早充分参与科学研究，以便我们能够继续发挥自己的潜力，为整个人类创造一个更美好的世界。我们需要进行机器学习，关于AI不能只限于应该如何的理论讨论，还应确保我们计划如何做到这一点。我们所有人都有可能推进被接受或预期的界限，并思考大问题。我们站在一个美丽新世界的门槛上。这是一个令人兴奋的，不过也将是危险的地方，而我们是先锋。

当我们发明火时，我们反复被火搞砸了一些事情，然后发明了灭火器。鉴于拥有更强大的技术譬如核武器、合成生物学和强人工智能，我们应该改为预先计划未来，并希望第一次就把事情弄妥，因为这可能是我们仅有的机会。我们的未来是一个技术日益增长的力量和使用它的智慧之间的竞争。让我们确保智慧胜利。



为什么我们如此担心人工智能呢？
人类总能拔插头吧？

“人们问一台电脑，‘存在上帝吗？’

电脑说‘现在有了。’并焊住插头。”

10 How do we shape the future？
我们如何塑造未来？

一个世纪以前，阿尔伯特·爱因斯坦彻底改变了我们对空间、时间、能量和物质的理解。我们仍然在确认他那些了不起的预测，就像2016年LIGO实验中观察到的引力波一样。当我想到聪明才智时，爱因斯坦立刻就会浮现在我的脑海中。他的奇思妙想来自何处？也许是许多品质的融合：直觉、原创、卓越。爱因斯坦有能力超越表面来揭示底层结构。他对常识毫不畏惧，常识认为事物必然是它们表面的那个样子。他有勇气去追求别人看似荒谬的观念。这给了他自由，让他成为天才，他的时代和任何时代的天才。

爱因斯坦具备的一个关键因素是想象力。他的许多发现来自于他通过思想实验重新构想宇宙的能力。在他16岁的时候，他想象骑在一束光上面，他意识到，从这个有利的位置看，光线会像一个冻结的波浪。这个形象最终导致了狭义相对论。

100年后，关于宇宙，物理学家们远比爱因斯坦了解得更多。现在我们有更强大的发现工具，诸如粒子加速器、超级电脑、太空望远镜和例如LIGO实验室对引力波的研究。然而，想象力仍然是我们最强大的品性。利用想象力，我们可以在空间和时间的任何地方漫游。我们在驾车、在床上打盹，或在聚会上假装听某人乏味谈话时，精神却能够遨游在自然最奇特的现象中。

还是男孩时，我就对事物如何运行充满激情。在那些日子里，我把东西拆开找出机制。我将拆开的碎片重新组装回玩具并不总是成功，但我想我比今天的男孩或女孩学得更多，要是他或她在智能手机上尝试同样的伎俩。

我现在的工作仍然是弄清楚事物是如何运行的，只是尺度变了。我不再摧毁任何玩具火车。相反的，我使用物理定律试图弄清宇宙是如何运行的。如果你知道事物怎么运行，你就能控制它。我这么说的时候听起来如此简单！这是一个吸引人的、复杂的事，在我的整个成年生活中它让我着迷并激动不已。我曾与世界上一些最伟大的科学家合作过。我

很幸运能够在所选择的领域——宇宙学，即宇宙起源研究的辉煌时代度过此生。

人的头脑是一件令人难以置信的东西。它可以设想天穹的壮丽和物质基本组成部分的复杂性。然而，为了让每个头脑都充分发挥其潜力，它需要一个火花，探究和惊奇的火花。

这种火花常常来自老师。请允许我解释一下。我不是最容易教的人，我读书的速度很慢，而且我的笔迹也不整洁。在我14岁的时候，我在圣奥尔本斯学校的老师迪克朗·塔他向我展示了如何利用我的精力，并鼓励我创造性地思考数学。他把数学视为宇宙本身的蓝图，这使我大开眼界。如果你看每个非凡的人物背后，总能发现一位特殊的老师。当我们每个人都在思考在生命中能做些什么时，我们很有可能因为一位老师而能这样做。

然而，如今，教育和科学技术研究比以往任何时候都更加岌岌可危。由于最近的全球金融危机和紧缩措施，所有科学领域的资金正在大幅削减，特别是基础科学受到严重影响。我们还面临着文化孤立和偏狭，以及日益远离正在取得进展的危险。在研究层面，跨边界的人员交流使技能更快地转移并带来因不同的背景而持有不同想法的新人。这本应很容易实现，而现在却变得举步维艰。不幸的是，我们不能在时间中回到过去。随着英国脱欧和特朗普现在对移民和教育发展的影响，我们正在目睹全球范围对专家，包括科学家的反感。那么我们可以做些什么来保障科技教育的未来？

我再回到我的老师塔他先生。教育未来的基础一定取决于学校和鼓舞人心的老师。但学校只能提供基本框架，有时死记硬背、方程和考试可以让孩子们远离科学。大多数人只要定性理解，而非定量理解，无须复杂的方程。科普书籍和文章也可以传达关于我们生活方式的想法。但是，即便最成功的书籍，也只有一小部分人阅读。科学纪录片和电影很吸引大众，可惜它只是单向交流。

当我在20世纪60年代开始进入宇宙学领域时，它是一个模糊不清的古怪的科学研究分支。今天，通过理论研究和实验的成果，如大型强子对撞机和希格斯玻色子的发现，宇宙学允许我们去发现研究宇宙。还有很大问题有待回答，还有很多研究要做。但是我们现在知道得更多，并且在这个相对较短的时段内取得了多过任何人能够想象到的成就。

但现在年轻人的未来会面临什么呢？我可以充满信心地说，他们的未来将比过去任何一代更多地依赖于科学和技术。他们需要比前人更多地了解科学，因为科学以空前的方式成为他们日常生活的一部分。

不必过于疯狂地推测，我们就可以看到一些趋势，我们知道的新问题必须在现在和未来得到解决。在我认为的问题中，有全球变暖、为大量增加的地球人口寻找空间和资源、其他物种的快速灭绝、开发可再生能源的需要、海洋的退化、森林砍伐和流行病，此处仅举几个。

还有未来的伟大发明，它们将彻底变革我们生活、工作、饮食、交流和旅行的方式。在生活的每个领域进行创新的范围这么开阔，这真让人兴奋。我们可以在月球上开采稀有金属、在火星上建立人类前哨，并找到目前不治之症的救治方法。此外，存在的巨大问题仍然没有答案。生命是如何在地球上开始的？什么是意识？外太空有人吗？还是我们独自在宇宙中？这些是留给下一代人去研究的问题。

有些人认为今天的人类是进化的巅峰，已臻于完美。我不同意。关于我们宇宙的边界条件应该有一些非常特别的东西，而还有什么比没有边界更特殊？而人类努力也不应该有边界。我认为人类的未来有两种选择：第一，探索太空寻找可居住的替代行星；第二，积极利用人工智能改善我们的世界。

地球对我们来说变得太小了。我们的物质资源正以惊人的速度消耗殆尽。人类向我们的星球呈送了灾难性的礼物：气候变化、污染、温度上升、极地冰盖缩小、砍伐森林和毁掉动物物种。我们的人口也以惊人的速度增长。面对这些数字，很明显，这种近乎指数式的人口增长无法持续到下一个千年。

考虑殖民其他行星的另一原因是核战争的可能性。有一种理论认为，我们没有被外星人接触过的原因是，当一个外星文明到达我们的发展阶段时，它变得不稳定并且自我毁灭。我们现在拥有摧毁地球上所有生物的技术力量。正如我们在朝鲜最近发生的事件中看到的那样，这是一个发人深省和令人担忧的想法。

但是我相信我们可以避免末日大决战的潜在性，而我们这样做的最好方法之一就是进入太空，探索人类生活在其他行星上的潜力。

影响人类未来的第二个发展是人工智能的兴起。

人工智能研究正在迅速发展。最近的标志，如自动驾驶汽车、赢得围棋赛的电脑以及数字个人助理西丽、谷歌即时和微软小娜的到来，仅仅是信息技术军备竞赛的征兆，这是由前所未有的投资和日益成熟的理论基础推动的。这些成就与未来几十年的相比也许是微不足道的。

但对人类，超智能人工智能的出现要么是最好、要么是最坏的事情。我们无法知道是否会从人工智能得到无限的帮助，或者被它忽视并且被边缘化，或者可以想象被它摧毁。作为一个乐观主义者，我相信我们可以为了世界的福祉创造人工智能，它可以和我们和谐地工作。我们只需要意识到危险，识别它们，采用最佳实践和管理，并为其后果预先做好准备。

技术对我的生活产生了巨大的影响。我通过电脑说话。我受益于辅助技术，它给了我一个已被疾病剥夺的声音。我很幸运在个人计算时代开始时失去了声音。英特尔超过25年一直在支持我，让我每天做喜欢做的事。这些年来，世界和影响它的技术都发生了巨大变化。技术改变了我们所有人的生活方式，从传播到基因研究，到获取信息以及更多更多。随着技术变得更聪明，它打开了我从未预言过的可能性的大门。现在为支持残疾人而开发的技术正为打破交流障碍引领道路。它通常是未来技术的一个试验场。从语音到文本、从文本到语音、家庭自动化、信号驾车，甚至赛格威平衡车，都是为残疾人开发的，这些都是在它们被日常使用之前好几年开发的。这些技术成就归功于我们内心的火花——创造力。这种创造力可以采取多种形式，从物质成就到理论物理。

但是还会发生更多的新生事物。人脑与电脑连接可以让这种被越来越多的人使用的沟通方式更快、更富有表现力。我现在使用脸书，它允许我直接与我的朋友和全世界的粉丝交谈，这样他们就可以跟上我的最新理论并查看我旅行中的照片。这也意味着，我可以看到我的孩子们此刻正在做什么，而不是他们告诉我他们在做什么。

就像对于几代人以前的社会，互联网、我们的移动电话、医疗成像、卫星导航和社交网络是难以理解的一样，我们未来的世界将以我们刚刚开始构思的方式同等地转变。不是信息本身，而是智慧地和创造性地使用信息将使我们实现这些。

还有这么多的东西要涌现，我希望这一前景能为今天的学童提供很大的启迪。不过我们可以发挥作用，确保这一代儿童不仅有机会，而且

希望尽早充分参与科学研究，以便他们能够发挥潜力，为全人类创造一个更美好的世界。而且我相信学习和教育的未来是互联网。人们可以回答和互动。互联网以某种方式将我们所有人联系在一起，就像巨脑中的神经元。有了这样的智商，还有什么我们不能做到？

有人说对科学不感兴趣，而且看不出有什么必要去关注，这种观点在我成长的年代，不是对我而言，而是按照社会成见，仍然可以被接受。现在情况已不再是如此。让我来说清楚。我不是在宣传这种想法，即所有年轻人应立志成为科学家。我不认为这是一个理想的情况，因为世界需要具有广泛技能的人。但我提倡所有年轻人都应对科学学科熟悉和自信，无论他们选择做什么。他们需要具备科学素养，并积极参与科学和技术的发展，以学到更多。

在我看来，一个世界只有极少数精英有能力了解先进的科学技术及其应用将是危险的、非常有局限的。我真怀疑，诸如清理海洋或救治发展中国家的疾病等大规模受益的项目是否会给予优先考虑。更糟糕的是，我们可能发现技术被用来反对我们，我们却没有力量阻止它。

无论在个人生活中，还是生命和智慧在我们宇宙中能做什么，我都不相信有边界。我们正站在所有科学领域的重要发现的门槛上。毫无疑问，我们的世界将在下一个50年发生巨大变化。我们将了解在大爆炸时发生了什么。我们将了解地球上的生命是如何开始的。我们甚至可以发现生命是否存在于宇宙的其他地方。虽然和一个聪明的外星人种交流的机会可能很渺茫，但这种发现的重要性意味着我们一定不要放弃尝试。我们将继续探索我们的宇宙栖息地，将机器人和人类送入太空。我们不能继续将自己向内局限于一个小的、越来越污染和过度拥挤的行星上。通过科学的努力和技术创新，我们必须向外开拓更广阔的宇宙，同时也要努力解决地球上的问题。而且我很乐观，我们最终会在其他行星上为人类创造可行的栖息地。我们将超越地球，学会在太空生存。

这不是故事的结束，而是我希望的将有数十亿年在宇宙中蓬勃发展的生命的开始。

最后还有一点。我们永远不会真的知道下一个伟大的科学发现将来自何处，也不知谁是发现者。张扬科学发现的兴奋和惊奇，以创新和方便的方式来触发尽可能广泛的年轻科学受众，大大增加寻找和激励新爱因斯坦的机会。无论他或她会在哪里。

所以记住仰望星空，而非注目脚下。尝试理解你所看到的，并追寻宇宙存在的原因。保持好奇心。无论生活多么艰难，总有一些事情你能做到并取得成功。重要的是你不要放弃。释放你的想象力，塑造未来。



你希望人类实现哪种改变世界的思想，
无论大小？

“这很简单。我希望看到聚变电源的发展能够提供无限量的清洁能源，并转向电动汽车。核聚变将成为一种实用的能源，并将为我们提供取之不尽的能源供应，而不会造成污染或全球变暖。”



A erword：*Lucy Hawking*
后记：露西·霍金

在剑桥春日的凄凉灰暗中，我们乘坐黑色汽车前往大圣玛丽教堂，这是在传统上为杰出学者举行葬礼的大学教堂。时值大学假期，街道似乎很平静。剑桥显得空空荡荡，甚至看不到一个游客。摩托骑警的蓝色闪光灯是唯一引人注目的颜色，他们护卫载着我父亲的棺材的灵车，阻断稀疏的车流，让我们畅通无阻。

接着，我们左转，我即刻看到人群聚集在世界上最易辨认的街道之一，也就是剑桥中心的国王大道。我从未见过这么多人如此沉默。无数横幅、旗帜、相机和手机高高举起，人们安静地沿街站列以表达敬意。这时，龚维尔和基斯学院（我父亲的剑桥学院）的首席门房礼仪式地戴着礼帽，携带乌木手杖，沿着街道庄严地走来迎接灵车，将它引入教堂。

我的姑妈紧握我的手，我们俩泪流满面。她对我耳语：“他会喜欢这个。”

自我父亲去世以来，发生了这么多会令他非常喜欢的事，这么多我希望他能够知晓的事。我希望他能看到从世界各地潮涌而来的缅怀之情。我希望他能知道数百万他从未谋面的人们是多么深爱和尊敬他。我希望他知道他将被葬在西敏寺，在他的两位科学英雄艾萨克·牛顿和查尔斯·达尔文之间，并且当他在地球上安息时，他的声音会被射电望远镜发射向一个黑洞。

但他也可能想知道所有无谓纷扰究为何事。他是一个令人惊讶的谦虚的人，虽然崇拜风头，但似乎也对自己的名声感到困惑。这本书中的一个短语引起我的注意，它概括了他对自己的态度：“如果我做出了贡献。”他是唯一会在这句话中加入“如果”的人。我想其他人都非常肯定他做出了。

而那是怎样的贡献！既在他的宇宙学研究，他探索宇宙本身的结构和起源的辉煌成就中，又在面对挑战时纯然人性的勇敢和幽默中。他找到了一种方式超越知识的界限，亦同时超越忍受苦难的极限。我相信正

是这种组合使他如此具有标志性，但又如此让人理解，如此平易近人。他备受伤痛，却坚忍不拔。他要竭力才能沟通，但他不屈不挠。随着行动自由不断丧失，他不断地适应他的设备。他精准地选择词语，以便在用那种毫无起伏的电子声音说话时能产生最大的效果，而这种声音在被他使用时变得如此奇特而富有表达力。当他说话时，人们倾听，无论是他对国家健康服务体系，还是对宇宙的膨胀的看法，他从不失去一个讲笑话的机会，笑话以最无表情的方式传达，他的眼中却充满了有趣的闪光。

我的父亲也是一个顾家男人，在2014年电影《万物理论》问世之前，大多数人都忽略了这个事实。在20世纪70年代，一个有配偶和自己孩子的残疾人当然不常见，也不容易找到具备如此强烈的自主和独立意识的残疾人。作为一个小孩子，我非常不喜欢陌生人随意盯着我们看的样子，他们有时还张着嘴，此刻我的父亲正驾驶轮椅在剑桥横冲直撞，伴随着两个头发乱蓬蓬的金发小孩，经常边吃冰淇淋边跑来跑去。我觉得这非常粗鲁。我曾经试图向他们瞪眼，但我认为我的愤怒没能够起作用，尤其是来自一张涂满融化棒棒糖的幼稚小脸。

无论怎么想象，那都不是正常的童年。我知道——然而与此同时，我又不知道这一点。我认为向成年人提出许多具有挑战性的问题是完全正常的，因为这正是我们在家里所做的。只有当我仔细检查牧师对上帝存在的证据导致他流泪时，我才开始意识到这与众不同。

作为一个孩子，我认为自己不是质疑型的。我相信我的哥哥是，他在任何事情上都比我聪明（事实上现在仍然如此）。我还记得一次家庭假期，像许多家庭假期一样，它与海外物理会议神秘地巧合。我哥哥和我参加了一些讲座，大概是为了让我的母亲从马不停蹄的照顾职责中短暂解脱。在那些日子里，物理讲座并不受欢迎，绝对不适合孩子。我坐在那里，在记事本上涂鸦，但是我哥哥高举那瘦小的胳膊，向一位杰出的学术主持人提问，而我的父亲脸上充满骄傲。

别人经常问我，“作为史蒂芬·霍金的女儿，有什么特别的？”不可避免地，几句话绝对说不清。我可以说棒的时候非常棒，难的时候也非常难，而且介于两者之间存在“我们称之为正常”的地方。成年后我们明白了，我们发现正常的东西对其他人来说并非如此。时间会让悲伤麻木，我想到也许我要花永久的时间才能消化我们的经历。在某种程度上，我甚至不确定我是否想要这么做。有时，我只想牢记父亲对我说的最后的

话，我是一个可爱的女儿，我应该无所畏惧。我永远不会像他一样勇敢。我本质上不是一个特别勇敢的人。但他告诉我，我可以试试。而这种尝试可能正是勇气中最重要的部分。

我的父亲从不放弃，他从不回避战斗。在75岁时，他已经完全瘫痪，只能移动一些面部肌肉，但他每天仍然起床，穿上西装去上班。他有事可做，并不会让一些琐碎的事情妨碍他。但我不得不说，如果他知道在他的葬礼上会出现摩托骑警，他会要求他们每天为他从剑桥的家到办公室的早晨通勤导航。

令人高兴的是，他确实知道这本书。这是他在地球上的最后一年所做的一个项目。他的想法是将他的当下写作集结成书。就像他去世后发生的那么多事情一样，我希望他能看到这个最终的版本。我想他会为这本书感到非常自豪，甚至连他也不得不承认，毕竟他已经做出了贡献。

露西·霍金

2018年7月

Epilogue：*Huateng Ma*
跋：马化腾

霍金博士为我们展现了一个奇妙的世界。我幼年时喜欢遥望星空，对浩瀚宇宙的奥秘十分好奇。对于我这样的天文爱好者来说，霍金关于宇宙种种问题的回答，很大程度满足着我们的好奇心。但是，他带给我们的远远不止于此。在我看来，霍金向我们展现了，一个现代人应该如何去思考、面对和创造未来；如何以赤子之心面对宇宙，在困境中不失去信心、乐观以及对人类的爱；如何点燃自己的想象力与好奇心，成为照亮人类前进道路的亮光……这些都是他留给我们最好的礼物。

在霍金的文章中，我找到了一些线索。他能为我们带来那么多礼物的原因，除了过人的天赋，还有良好的教育。他特别提到，十四岁时碰到的一位老师，如何鼓励自己创造性地思考。他承认，“每个杰出的人背后，都有一位特别的老师”。我相信，未来的教育需要更多特别的老师，来呵护每一个孩子的想象力与好奇心。像霍金这样好奇“宇宙如何运行”的孩子，只有不断得到鼓励，才能克服重重困难，最终发现前人未知的奥秘。这是科学发现与技术创新的基础。

霍金还把目光投向更深远的未来。他对人类是否能善用科技心存担忧，尤其今天我们已经掌握了毁灭人类自己的技术，我们就不得不参与一场“只许成功，不许失败”的赛跑：人类善用科技的智慧必须胜过日益强大的科技。我认为，确保人类在赛跑中获胜的关键在于，未来的孩子们是否能够拥有一双相互协调、同等强壮的“腿”：科技与文化。这是未来教育需要解决的问题，也是腾讯作为以互联网为基础的科技与文化公司正在深入思考的方向。

霍金不仅仅是一位向我们传递科学知识的学者，他对于未来人类命运的思考和关切本身，就是人文教育的典范。他给未来的年轻人留下一

连串待解的问题：生命如何在地球上诞生？意识究竟是什么？我们在宇宙中是孤独的吗？可以说，这些问题既是科学问题，也是文化问题。对于未来，我与霍金博士一样乐观。我也相信，无限的星空一定蕴藏着解决我们生存问题的地方。

马化腾

Notes of Translator：Hawking and the Heavenly Inquiries *Zhongchao Wu*
译后记：霍金和十问　吴忠超

2018年3月14日，史蒂芬·霍金逝世，享年76岁。他永远离开了这个他无比热爱的世界，而这一天恰好是爱因斯坦139年诞辰。此后的几天里，我急切地等待霍金的葬礼日程安排，希望向他做最后的告别。3月17日我收到剑桥大学的通知，说他们很快就会发出通告，但没有透露任何具体信息。在这之前，霍金的前妻简已经去过剑桥城西北万灵巷的升天教区墓园勘察并选址。

这块小墓园偏僻而宁静，凝缩着剑桥大学近150年的历史。我至少去过两回，第一回是在22年前的复活节。安息在此的学者中，最著名的便是20世纪最伟大的哲学家维特根斯坦、天文学家亚当斯和爱丁顿，还有达尔文家族（达尔文本人葬于伦敦西敏寺）、《金枝》的作者弗雷泽，以及一些诺贝尔奖得主。亚当斯独立地计算出天王星轨道和开普勒及牛顿定律的偏离，并预言了海王星的存在。爱丁顿在西非日食时探测到光线在太阳引力场中的偏折，首次验证了广义相对论的预言。这些都和霍金毕生从事的引力物理紧密相关。事实上，霍金和彭罗斯还分享了1966年的亚当斯奖与1975年的爱丁顿奖章。

我对许多朋友说起，估计葬礼计划之所以迟迟未公布，很可能当局还有其他想法，是要把他葬在伦敦西敏寺。果然，3月19日简给我来信，邀请我参加霍金在剑桥的葬礼和在伦敦西敏寺的安葬仪式。她在信中还告诉我霍金将会被葬在牛顿墓旁。霍金将和人类的伟大先驱哥白尼、伽利略、开普勒、牛顿以及爱因斯坦一样，从此在智慧的星空中发出永恒的光芒。

1942年1月8日，霍金诞生于牛津，这正是伽利略逝世300年忌日。

这一巧合似乎暗示着他将献身于科学，特别是宇宙学的研究。他的幼年在伦敦的海格特度过。值得一提的是，海格特公墓西区安息着电磁感应定律的发现者法拉第。1950年，随着从事热带病研究的父亲工作的变动，霍金全家搬到伦敦更北的圣奥尔本斯。他在那里完成了中学教育，并按照他父亲的意向，于1959年考取了父亲的母校牛津大学。

1962年霍金从牛津大学毕业，转到剑桥大学攻读博士学位。他原先想追随剑桥理论天文研究所的创建者，英国当时最著名的天文学家弗雷德·霍伊尔。但霍伊尔已经收满了学生，所以西阿玛被指定为他的导师。这个阴错阳差对他的未来特别关键。如果他跟随霍伊尔，那他就得像霍伊尔的一位非常著名的印度学生纳里卡一样，去捍卫霍伊尔等倡导的稳恒态宇宙模型。虽然1929年哈勃发现了宇宙的红移定律，由此得知宇宙正在膨胀，然而它是由伽莫夫等提出的大爆炸模型，还是由霍伊尔等提出的稳恒态模型描述还不清楚。20世纪60年代早期，马丁·赖尔领导的剑桥射电天文学小组对弱射电源进行调查，其观察结果和稳恒态模型的预言相悖，而1964年彭齐亚斯和威尔逊非常偶然地发现了宇宙微波背景，这彻底地证伪了稳恒态模型。

西阿玛门下出现了许多杰出的引力物理学家，除了霍金之外，还有马丁·里斯、布兰登·卡特、乔治·埃利斯等，他还把才华横溢的数学家罗杰·彭罗斯吸引到引力物理领域来。西阿玛说过，他对科学的最重要贡献就是培养出了霍金。

霍金在牛津上本科三年级时就发现自己的行动变得笨拙，去剑桥上学后的第一个圣诞节假期，他在湖上滑冰跌倒时无法站起，几经周折后被诊断为患了不治之症——渐冻症。通常认为这种病人只有一两年可活。可以想见，那时他的情绪有多么低落。此时他非常幸运地遇到了一位年轻的女子简·王尔德。简的爱情给予他以生活的希望。可以毫不夸张地说，如果没有简，就没有后来的霍金。

霍金在他的天才焕发和病情发展的竞跑中赢得胜利。英国民族对学术的崇尚，尤其是剑桥大学对天才的珍惜，是产生霍金这样人物的必要条件。1965年，他就被选为龚维尔和基斯学院的研究员，他在这个学院任职终身。这个学院是剑桥现存的第四古老的学院，是牛津、剑桥仅次于三一学院获诺贝尔奖最多的学院，共有14名成员获奖。学院深具医学传统。17世纪，威廉·哈维证实了血液循环现象。1953年，弗朗西斯·克里克和美国人詹姆斯·沃森发现了DNA的双螺旋结构，我们在学院的窗玻璃上可以看到这个结构的示意图。

即便单从医学的角度看，他已成为渐冻症患者中存活最久的人，55年——这是空前的。这使我们联想起伟大的数学家欧拉，他28岁时右眼失明，59岁时左眼也几乎失明，从此17年处于黑暗之中，他也是活了76岁。

引力物理在爱因斯坦于1915年提出广义相对论后发展缓慢。在20世纪60年代之前它几乎沦为应用数学的一个分支，这是因为爱因斯坦的场方程非常复杂，而且从该方程的解很难抽取物理意义。费曼对这种状态极为不满，他去华沙参加一次广义相对论会议后，甚至让他的夫人提醒他将来绝不可参加这种会议，以免高血压发作。

这种面貌因惠勒学派，尤其是彭罗斯、霍金和盖罗许的研究而焕然一新。惠勒学派的方法是在足够对称的时空进行微扰计算，而彭罗斯变革性的观点是关注时空的拓扑，尤其是它的共形结构，为此他和卡特发明了卡特-彭罗斯图的有力工具。1965年，彭罗斯发表了划时代的论文《引力坍缩和时空奇点》，该论文证明引力坍缩导致黑洞中的奇点。同年，霍金将相同的思路应用到整个宇宙，证明了如果广义相对论是正确的，物质的能动量张量满足某些非常合理的条件，那么宇宙必定起始于大爆炸的奇点。在霍金宣布这个结果之前，还有人以为大爆炸可能是以前的一个收缩相的反弹。这个结果是他的博士论文《膨胀宇宙的性质》最精华的部分。

此后，在经典引力物理中，霍金对黑洞理论做出了许多根本性的贡献，诸如他和同行们证明了黑洞的无毛定理，他指出四维时空的黑洞视界的拓扑必须为球面。但最为人称道的是他提出了黑洞视界面积不减定理。

黑洞面积定理是说，黑洞演化甚至黑洞合并，其总的视界面积不减。1971年，霍金由此推出由两个黑洞碰撞引起的引力辐射的能量上限。44年后的2015年由LIGO实现的首次引力波观测证实了这个结果。1973年，他和巴丁、卡特合作发表了题为《黑洞力学的四个定律》的论文，将其和热力学的四个定律做平行的比较。

霍金对经典引力物理的贡献被总结在他和埃利斯合著的《时空的大尺度结构》一书中。这是一部研究时空拓扑和因果性的集大成著作。可以说，这方面的问题几乎已经被这部书穷尽了。实际上，自1973年问世之后，再也没有这个方面的著作能超越它。

彭罗斯和霍金的奇性定理表明，经典广义相对论不是一个完备的理论，它在奇点处崩溃了。为了得到自然的完备描述，必须将20世纪发现的另一个伟大的理论——量子论和相对论合并成量子引力。所以在和埃利斯合著的书出版后，霍金的研究就从经典相转向量子相。

1974年霍金在研究黑洞附近的量子场论效应时，发现了从黑洞的视界向无限远处辐射粒子，这种粒子的谱具有黑体辐射的形式。在最简单的史瓦西黑洞的情形，其温度和黑洞的质量成反比。黑洞辐射使黑洞损失质量，从而温度升高而辐射加速，黑洞最终以巨大的爆炸结束其生命。受黑洞面积定理的启示，普林斯顿大学的研究生贝肯斯坦曾经猜测，黑洞的熵应和视界的面积成比例。霍金的这篇论文证明了，在所谓的普朗克单位下，黑洞的熵恰好是它视界面积的四分之一。这个结果启发了后人发展出引力全息原理。

这篇在爱因斯坦之后最重要的引力物理的论文，寄到一家国际刊物后，居然在一年内毫无声息，后来被告知论文丢失。最后发表时标明的接收日期是按再次交稿时算，此前它早已被学术界广泛引证。这个杂志后来邀请霍金任顾问。

霍金从黑洞辐射场景很快意识到，黑洞辐射场景会导致所谓的信息悖论。无论由什么物质以何种配置坍缩形成黑洞，无毛定理都告诉我们，黑洞仅由总质量、角动量和电荷来表征。黑洞最后要蒸发并爆发消失，所以除了这几个参数，所有的信息都丢失了。信息悖论是理论物理学界40多年未彻底解决的重要问题之一。

1974年霍金被选为英国皇家学会会员。1977年他被任命为引力物理教授。这是剑桥为其量身订制的。那个时代，剑桥规定每一个研究组都只有一名教授，直到有了空缺才能递补，所以绝大多数剑桥人终身任讲师。但对天才可以暂设教授位置，这就是霍金的情形，两年后他被选为卢卡斯数学教授，引力物理教席也就自动取消了。

卢卡斯数学教授是科学史上最崇高的教席，因为牛顿和狄拉克都是他的前任。我有幸见证了霍金的就职仪式，他发表了题为“理论物理的终结可能在望吗？”的演讲。狄拉克生前多半时间在圣约翰学院埋首研究，很少到应用数学和理论物理系来，而霍金经典相时期和他的研究交集不多。后来狄拉克退休搬到佛罗里达并终老于彼，只有夏天回剑桥，有时会到系里，但我从来没有遇到过他。1975年他在梵蒂冈曾当面告诉霍金，是他推荐霍金获得庇护十一世奖章的。1984年狄拉克逝世后被埋葬在佛罗里达，但1995年伦敦西敏寺为他在牛顿墓旁安放纪念石，并邀请霍金在仪式上致辞。

1982年夏天，霍金和吉本斯在剑桥召开了极早期宇宙学的会议。这

是在该领域影响最深远的会议。早在20世纪70年代，狄克等就指出在大爆炸宇宙模型中存在一些严重问题，如宇宙微波背景因果性问题、单极子问题，尤其是空间平性问题，后者体现了宇宙演化对初始条件的极度敏感性。固斯和林德等认为，如果在大爆炸相前宇宙以指数式膨胀，即存在一个暴胀相，那么这些问题就可以避免。不过，由于暴胀的机制或暴胀子不能从第一原理推出，所以不少人对这个场景抱迟疑态度，认为它只是一个唯象模型。但是，这次会议取得了一个重要的进展，那就是霍金等人提出，在暴胀背景下，经典无规性很快就被暴胀抹平，而量子场涨落应是宇宙结构，比如星系团和星系的籽。事实上，那也正是8年前霍金和吉本斯把对黑洞视界辐射推广到宇宙视界时研究过的量子涨落。10年后，宇宙背景探索者卫星探测到由这个涨落引起的微波背景温度在不同方向的差别。后来WMAP和普朗克卫星的观测更证实它和预言精确一致。

这次宇宙极早期的会议重新唤起了霍金对宇宙学，尤其是宇宙学中最重要的问题——宇宙创生的兴趣。他坚信这个问题应属于科学的王国。实际上，早在1981年，他就在梵蒂冈教廷科学院的一次会议上提出了宇宙的边界条件是它没有边界的设想。他认为没有什么边界条件比宇宙没有边界更美妙了。1983年他和哈特尔一起将这个思想用数学表述出来。在他的模型中，无边界设想意味着，宇宙一创生进入实时间就处于暴胀阶段，然后才进入大爆炸阶段。场的量子涨落在暴胀阶段处于基态。与此相比，在暴胀宇宙模型中，暴胀子和基态涨落都是人为设定的。基态的涨落可分解为标量和张量两部分，这些微扰的演化，标量部分可以与宇宙微波背景温度起伏做比较，而张量部分可望与太初引力波的谱做比较。

宇宙学最初的大爆炸模型并没有预见性，暴胀宇宙模型只具有半预见性，即相当广泛的，而非所有的初始条件会导致我们所观测的宇宙。无边界设想赋予宇宙学完全的预见性。事实上，宇宙的演化完全由科学定律所决定。这就彻底解决了从牛顿时代开始就困扰人类的第一推动问题。在无边界宇宙学的框架中可以研究宇宙的暴胀、结构、各向同性、旋转、维数、时间箭头、太初黑洞和太初引力波。

霍金在发展无边界宇宙学的同时萌生了写一部宇宙学和黑洞科普书的想法，这就是畅销至今的《时间简史》。霍金从一位科学天才成为大众明星，主要是因为这部书的出版。

他和简养育了三个孩子，罗伯特、露西和蒂莫西。1995年和简离婚，同年和伊莱恩·梅森结婚。2006年和伊莱恩平和分手。

他一生得到无数荣誉，也到过许多国家讲学。

他对中国有极大的好奇心，但他对中国的学术界很不了解。20世纪80年代，我建议他访问中国科技大学，并帮助联系。1985年他的第一次访华成行，在合肥和北京各做一次学术报告，游览了故宫和长城。

2002年和2006年，他应丘成桐的邀请访问杭州、北京和香港，游览了西湖、天坛、颐和园，再次登上长城。2002年的访华由伊莱恩陪同。我在杭州当他的翻译。2006年访华时伊莱恩没来。应他的要求，我全程陪同他。我用最简单的相机给他在天坛祈年殿前拍的照片，被他选用在自传《我的简史》中。他在世界各地旅行期间拍摄的照片何止万千！可以想见神秘的中国多么吸引他。

从我认识霍金直到他去世，39年是个漫长的时间。1979年，我受他邀请来到他的研究小组，在他指导下完成了博士论文，研究方向是极早期宇宙中的引力效应，包括相变泡碰撞的时空度规准确解，以及引力坍缩问题。1984年在我得到剑桥博士学位后，他继续指导我从事量子宇宙学的研究，我们合作的宇宙波函数第一个数值解发表于1985年。之后他推荐我到欧美游学。

1997年他得知我在梵蒂冈天文台访问，就邀请我在欧洲最好的季节复活节访问剑桥。我在他的办公室第一次见到他的第二任夫人伊莱恩。那次他对我表达了要访问中国的强烈愿望。但后来因为阴错阳差没有成功。

2004年他再次邀我来剑桥。2004年12月10日，我在他的办公室里问他，黑洞辐射和无边界宇宙这两个贡献中，他究竟认为哪项更为重要？他回答道，“别人认为黑洞辐射更重要，因为它已经被接受了，我却认为无边界设想更重要。”

2006年湖南科学技术出版社的朋友们和我应邀来剑桥看望他，他主动提出把所有的科普著作都交给湖南出版。他还单独请我到他的学院上席晚宴，喝咖啡，再到他家闲聊，直到深夜一点。他那回精神非常好。我们仔细讨论了将去北京开会的细节，我问他最喜欢中国哪个城市，他说我才去了这么少的地方。但他对合肥的印象最深。

2009年，我应他邀请又来剑桥时，他大病初愈。他在得知我们要离开时，立即从家里赶到办公室和我们话别。我们看到他满脸病容，心里既难过又感动。我们合影留念，但我们不忍心将照片公开。

2012年我应邀参加他的70岁生日庆祝会议，由于他身体衰弱，医生建议他不要露面。

2017年7月，我去剑桥参加庆祝霍金的75岁生日的学术会议。受霍金著作中文版责编孙桂均之托，我带去了霍金像双面绣，该绣品是长沙五位湘绣大师花7个月时间精心制作的。我将这幅栩栩如生的艺术品当面送给霍金，以感谢他对湖南科学技术出版社几十年的信任。应孙桂均

的要求，我为这幅湘绣拟了两行字："黑洞辐射贯通引力量子信息，无边界律驱动宇宙无中生有。"

这两行字浓缩了霍金一生最重要的科学贡献。第一项研究追索什么才是更基本的，是时空，还是信息？这是本体论的问题。第二项研究宇宙何以创生，这是存在论的问题。他甚至说过，必须存在一套完备的统一理论，如果不存在的话，宇宙就消失了。

在参加剑桥和伦敦的追悼活动时，我曾经用文字将这些历史场景记录下来。他离去的时刻，使我极为真切地感到，"他为这个文明理解时空、宇宙和存在的推进，以及对人类道义和社会的普适关怀，在他逝去后将会逐渐展现出其深远的意义。"

我对霍金逝去的感受，完全符合他这部遗著《十问：霍金沉思录》的主旨。

两千三百多年前，楚国的屈原在《天问》的一开始就追寻宇宙本源问题，一千年后唐代的柳宗元的《天对》对此做了回应。在希腊，大约和屈原同时代，阿利斯塔克就已经提出日心说的雏形。16世纪哥白尼建立了完整的日心说宇宙体系。17世纪的伽利略用天文观测支持哥白尼学说，而开普勒发现了行星运动定律，还把宇宙的和谐视为终极真理。牛顿的学说将伽利略和开普勒的事业发扬光大。直至19世纪末，牛顿的时空观还一直被当作科学界的金科玉律，康德把他对牛顿时空观的迷惑表述为二律背反。直到大约一百年前的哈勃红移定律的发现，以及爱因斯坦广义相对论的提出，人们才大体得到今日之宇宙图像。所有这一切都是对亘古天问的回应。

霍金在本书回答的大问题正是当代的天问，是地球文明的思想家对人类和宇宙命运的叩问，是人和天的问对。它们是：上帝存在吗？一切

如何开始？宇宙中存在其他智慧生命吗？我们能预测未来吗？黑洞中是什么？时间旅行可能吗？我们能在地球上存活吗？我们应去太空殖民吗？人工智能会不会超过我们？我们如何塑造未来？也许只有万物之灵的人类才能对宇宙存在等寻根究底，因为他们不甘满足于存活和繁衍，那只是动物的本能。同理，民族的形而上的发展表征其文明演化的程度。

宇宙无中生有地创生后，最美妙的事件是孕育了生命，以及生命的子集升华出意识，而其中最珍贵的子集能理解宇宙和自身。霍金，这个完全以思维为存在方式的生命，在决定以揭开宇宙的奥秘为终身使命后，从来没有抱怨过自己深受的病痛。这使人想起康德，他说自己的生活就是几道观念。霍金已经离开我们远去了，但他对人类命运的关怀和劝诫，都是我们面对这个世界的愚蠡和贪婪时的一剂安慰。

从1988年2月24日他给我来信，嘱托将《时间简史》译为中文，31年过去了。湖南科学技术出版社为出版霍金著作付出了大量的心力和智慧。霍金的这部遗著无疑是他毕生探索的结晶，是他留给人类的最宝贵的思想遗产。

在这部书的翻译过程中得到许多朋友，特别是夏阳友的慷慨帮助，志此致谢。

吴忠超

2019年1月，杭州望湖楼

Postface：Revisiting Hawking in Loving Memories *Guijun Sun*

编后记：此情只待成追忆　孙桂均

2018年3月14日，20世纪伟大的物理学家史蒂芬·霍金逝世，享年76岁。这一天开始，这个星球上无数的人以超越了种族、国家、宗教与信仰、文化与语言隔阂的崇敬与爱戴之情，缅怀和纪念这位科学巨人。这种超然的感情，惟霍金、爱因斯坦等为数不多的科学巨匠们才配拥有。他们是人类智慧的标杆，是人类探索自然、穿越时空、寻找真理、追求幸福，迈向自由王国的开拓者和引领者。3月15日一大早起，我的手机就一直响个不停，很多人打来电话，多家媒体就霍金突然去世要求采访。面对霍金去世的消息我几度哽咽无语，脑子一片空白，采访难以为继。我翻出与霍金在他剑桥大学办公室合影的照片来看，照片似乎变得有些模糊。我一时难以接受霍金就这么突然走了的事实。

2018年6月初，我收到来自另一半球参加霍金入葬仪式的邀请函，仪式将于6月15日在伦敦泰晤士河畔著名的西敏寺内举行。霍金的骨灰将被葬在牛顿墓和达尔文墓之间。在他安息处周围，还有法拉第，麦克斯韦，卢瑟福和狄拉克的墓或纪念石。但因种种原因我最终未能成行，实为憾事。

20世纪80年代，我走进湖南科学技术出版社，成为一名科技图书编辑，因种种机缘巧合，我这个普普通通的中国人，很荣幸与享誉世界的科学家、剑桥大学卢卡斯数学教授史蒂芬·霍金结下了不解之缘。霍金的著作《时间简史（插图版）》《果壳中的宇宙》《时间简史（普及版）》《大设计》《我的简史》，还有这本即将面世的《十问：霍金沉思录》等，以及与他相关的绝大多数图书都是由我担任责任编辑，推荐给中国读者的。

2006年4月，我第一次在剑桥大学拜访霍金，6月，再次在北京见到他。自那以后，每当我翻阅霍金著作的书稿时，字里行间总是时不时闪现出一位瘫软在轮椅中的瘦弱老人的身影，而这些闪烁着人类智慧之光的书稿竟然出自这样一位虚弱老人之手，不能不令我对老人家肃然起敬。两次拜访霍金，他都十分艰难地露出笑容来欢迎我们，那是儿童般天真无邪的笑容，一如春天里明媚的阳光，让人暖暖地感动着。

第一次到剑桥大学拜访霍金时，我们与霍金达成了两个重要的心愿。一是霍金所有著作的简体中文版都将交由湖南科学技术出版社出版，至此，湖南科学技术出版社获得了出版霍金所有著作简体中文版的优势地位；二是由我提出的选题《中国读者致霍金教授的信》，霍金应允将挑选部分内容给予回复。

霍金于21岁时开始罹患肌肉萎缩性（脊椎）侧索硬化症，不久以后他便被禁锢在轮椅上，有医生预言他只能活几年了。然而，霍金却以乐观豁达的人生态度和顽强毅力，在他的轮椅上扩展了人类认知宇宙时空的科学大门。他一年又一年顽强地活着，和我们一道走过20世纪后半叶，又走进21世纪。他如此顽强的生命力，让他的亲朋好友都为他高兴，不再担忧他生命的脆弱。我也相信，霍金能一直走向未来。2017年，他还曾预言2600年地球将面临终结的可能，之前他还告诫人们要注意控制和规范人工智能的运用。然而，他终究离去，而《中国读者致霍金教授的信》却未能成书出版，成为我此生一大憾事。

《十问：霍金沉思录》是霍金最后的遗作，本书就人们普遍关心的宇宙时空的起源、历史、未来，有没有上帝（大神）存在，人类的过去与未来，地球、太阳、银河系的命运、走向与归宿等相关的10个最基本的重大问题做出了科学的解答与判断。巧合的是，《中国读者致霍金教授的信》选题构架设想中的某些问题与《十问：霍金沉思录》的问题和内容相同或相近。因此，本书也可以视为是一本《中国读者致霍金教授的信》，而实际上，它也就是一本霍金致全球粉丝与读者的回答。本书凝聚了霍金一生的科学探索成果和思想。

13年前我首次拜访霍金时，在他办公桌边的一个乐谱架上，我看到一行英文字：“I am the center of the universe.”以我当时对霍金科学成果的粗浅理解与认知，我将这句话理解为——“我在宇宙的中心。”我曾在另一篇关于霍金的文章中这样描述：“我默默地注视着轮椅中这位虚弱的老人，想象他拿着开启宇宙大门的钥匙，穿过无数迷宫般的房间，在上帝那到处都是交叉小径的后花园里遛达时，正好碰到上帝也出来散步，于是他迎上去说：‘嗨，我在宇宙的中心！’上帝吃惊地看着这位来自人间的勇敢闯入者。”

几年以后，我开始慢慢理解霍金两项最重要的科学贡献——黑洞辐射和无边界宇宙设想，才逐渐体会到霍金心中的那份骄傲与万丈豪情，乐谱架上的那行英文字的意思应该是——“我是宇宙的中心！”在经典物理的框架中，他证明了宇宙起始于无限密集的奇点。在量子物理的框架中，宇宙是无中生有地创生，时间和空间也随之出现，宇宙像吹起的气球一样膨胀。

霍金不但是一位伟大的科学家，也是一位具有博大情怀、爱心与责任心的思想家和哲学家。

他说——

我在这个星球上过着一种非凡的生活，我利用奇思异想和物理定律穿越宇宙。我到过银河系最远处，旅行进入过黑洞，还返回过时间的起始。在这个地球上，我经历了高潮和低谷、动荡与安宁、成功和痛苦。我遭遇贫穷，享受富裕，曾经矫健，又身患残疾。我既受到赞扬，也受到批评，但从未被忽视过。我很荣幸能够为人类对宇宙的理解做出贡献。但如果宇宙中不存在我所爱且爱我的人，那的确会是一个空虚的宇宙。没有他们，它的一切奇迹都对我毫无意义。

有朝一日，我希望我们能够知道所有这些问题的答案。但还有其他挑战，必须回答地球上的其他重大问题：我们将如何养活不断增长的人口？如何提供干净的水、产生可再生能源、防止并治愈疾病、减缓全球气候变化？我希望科学技术能够回答这些问题，但需要人，有知识和理解的人，去实施这些解决方案。让我们为每个女人和男人奋斗，为了让他们都能过上健康、安全，并充满了机会和爱的生活。我们都是时间旅行者，让我们一起踏入未来。让我们共同努力，使这个未来成为我们想去访问的地方。

2019年1月12日，我收到霍金女儿露西寄来的圣诞（新年）贺卡。看着贺卡上霍金头像的纪念邮票，我抬头望向铅灰色的天空，默默无言。

3月14日，是霍金逝世一周年纪念日，在这个时间前后，我们将《十问：霍金沉思录》付梓出版，以飨国内广大霍金迷和读者，共同缅怀这位高尚而纯粹的智者。

孙桂均

2019年2月6日于长沙

Acknowledgements
致谢

感谢基普·S.索恩、埃迪·雷德梅恩、保罗·戴维斯、赛斯·肖斯塔克、史蒂芬妮·雪莉夫人、汤姆·纳巴罗、马丁·里斯、马尔科姆·佩里、保罗·谢拉德、罗伯特·柯比、尼克·戴维斯、凯特·克雷吉、克里斯·西姆斯、道格·艾布拉姆斯、詹妮弗·赫尔希、安妮·斯佩尔、安西娅·贝恩、乔纳森·伍德、伊丽莎白·弗雷斯特、尤里·米尔纳、托马斯·赫托格、马化腾、本·鲍伊和费·道克帮助编写本书。

史蒂芬·霍金因其在职业生涯中科学和创造性的合作而闻名，从与突破性科学论文的同事合作，到与诸如《辛普森一家》的团队剧作家合作。在他晚年，史蒂芬需要从他周围的人那里得到越来越多的支持，无论是在技术上，还是在协助交流上，都是如此。

遗产机构感谢所有帮助史蒂芬继续与世界沟通的人们。

[1]诺贝尔奖不能在死后颁发，所以遗憾的是，这一志向永远不会实现。

我的简史

MY BRIEF HISTORY

★ 宇宙之王解读自己的宇宙

MY BRIEF HISTORY

被禁锢在轮椅上的巨人和世人的倾心交谈 ★

[英]史蒂芬·霍金/著 吴忠超/译

STEPHEN HAWKING

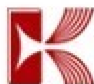
湖南科学技术出版社

版权信息

我的简史/史蒂芬·霍金著.—长沙：湖南科学技术出版社2014.5
ISBN 978-7-5357-7137-8
I.①我…　II.①史…　III.①科普-传记-名人自传　IV.①1267.4
中国版本图书馆CIP数据核字（2014）第221500号

我的简史

著者　史蒂芬·霍金
译者　吴忠超
责任编辑　孙桂均　李媛
文字编辑　陈一心
装帧设计　谢颖
出版发行　湖南科学技术出版社
社址　长沙市湘雅路276号（邮编：410008）
http://www.hnstp.com
邮购联系　本社直销科0731-84375808
印刷　长沙超峰印刷有限公司
（印装质量问题请直接与本厂联系）
厂址　长沙市金洲新区泉洲北路100号（邮编：410600）
出版日期　2014年5月第1版第1次
开本　787mm×1092mm　1/32
印张　4.5
字数　500，000
书号　ISBN 978-7-5357-7137-8
定价　38.00元
（版权所有翻印必究）


湖南科学技术出版社
HUNAN SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS

目录

版权信息
中文版序
第一章 童年 CHILDHOOD
第二章 圣奥尔本斯 ST.ALBANS
第三章 牛津 OXFORD
第四章 剑桥 CAMBRIDGE
第五章 引力波 GRAVITATIONAL WAVES
第六章 大爆炸 THE BIG BANG
第七章 黑洞 BLACK HOLES
第八章 加州理工 CALTECH
第九章 婚姻 MARRIAGE
第十章 时间简史 A BRIEF HISTORY OF TIME
第十一章 时间旅行 TIME TRAVEL
第十二章 虚时间 IMAGINARY TIME
第十三章 无边界 NO BOUNDARIES



中文版序

全球学界期盼已久的霍金自传《我的简史》终于出版了。这部书必将和有史以来一些思想家的自传，如圣·奥古斯丁的《忏悔录》、阿伯拉尔的《我的苦难史》和卢梭的《忏悔录》一样，传诸后代。它的问世也使其他霍金传记顷刻黯然失色。

霍金诞生于1942年1月8日，这天正是伽利略的300年忌日，而牛顿又恰巧诞生于伽利略逝世的那一年，这似乎暗示着霍金一生的使命。霍金70岁生日之际，剑桥大学和国际同仁为他举办了“宇宙的态”的学术会议，并从全球各地邀来霍金的学界友人、过去的合作者和学生共100余人聚会庆祝。译者是来自两岸三地学术机构的唯一受邀者。生日晚宴在最负盛名的三一学院举行，这里正是牛顿在几年间从一个农家子弟成长为科学巨人的圣殿，也是科学乃至学术史中许多伟大变革的舞台。从这里走出的哲学家弗兰西斯·培根、罗素、维特根斯坦，诗人拜伦，科学家麦克斯韦、汤姆孙、卢瑟福等一连串光辉的名字无不让人敬仰有加。

可惜由于霍金的健康状态，医生不允许他在庆典的几天里亲临出席。我有幸在宴会中和他的第一任夫人简交谈并留影纪念。简告诉我，她的高祖父是宁波的教师，她的曾祖父也许为了逃避呆板的教育，去澳大利亚闯荡谋生时邂逅来自英国的曾祖母，所以她具有八分之一华人血统。她希望能在中国找到有关记录。霍金在生日前预先录制了题为《我的简史》的视频，并让在宴会之前向来宾播放。它是这部自传的雏型。

一个历史人物的任何传记都无法取代自传。人的精神世界如此丰富并不停演化，它是不可能被复制的，也不可能被他人精确摹写。况且，本书传主已被大众媒体塑造成先知的形象，而他的已有传记的角度都是仰视的。

霍金是第十七任剑桥大学卢卡斯数学教授。他是当代最著名的健在的科学家。他的最重要的贡献是黑洞蒸发理论和宇宙创生理论。

和《时间简史》只纳入爱因斯坦的质能等效公式一样，本书仅纳入了一个公式，即霍金的黑洞熵公式：在普朗克单位下，黑洞的熵等于黑洞视界面积的四分之一；在通常单位下，光速、万有引力常数、普朗克常数和玻尔兹曼常数在这个公式中都显现出来。这体现出引力论、量子论和热物理在霍金黑洞辐射的场景中得到了统一。

当今，绝大多数物理学家都已接受了霍金的黑洞蒸发理论。如果说半个世纪前人们还对黑洞的存在心存疑虑，那么现在这个疑虑已经烟消云散了。可惜的是，太阳质量数量级的黑洞的霍金温度只有百万分之一开左右，它被淹没在宇宙微波辐射的2.7开的背景之中。这就使他还未得到诺贝尔物理学奖。其实，相对论的理论工作从未得到过诺贝尔奖。

如果说爱因斯坦的广义相对论提出引力由时空的弯曲来体现，那么霍金的黑洞蒸发理论发现了引力或时空的热性。几十年来，引力物理学家从这个理论出发，发展出引力全息原理等许多激进的观念。狭义相对论抛弃了多余的以太思想，广义相对论摆脱了绝对时空观念，而物理

学在霍金黑洞理论后面临的一个重大问题是，时空和熵哪个更基本的本体论问题。我们的时空观离开100年前的爱因斯坦理论相当远了，更不用说离开300年前的牛顿理论了。我们知道，传说中的伽利略的比萨斜塔实验的真正含义，300多年后才被爱因斯坦的广义相对论完全揭示出来，由此变革了人类的时空观和宇宙观。可以想象，霍金发现黑洞辐射的变革性影响会在未来的岁月渐次显现，其意义的深远甚至不亚于寻求到统一理论。

1980年代初，他和哈特尔提出了量子宇宙学的无边界设想：宇宙的边界条件是它没有边界。这就实现了无中生有的宇宙量子创生场景，并一劳永逸地在原则上解决了困扰人类千年的第一推动问题。宇宙学从此才有了预见性：宇宙中的一切单凭物理定律就能被推出。从此，宇宙学不仅是自洽的，而且是自足的。上帝和造物主在他的理论中都无存身之处。而且他还认为，宇宙存在无非就是一族相互协调的并和观测一致的自然定律。

那么，霍金的两个主要贡献哪个更重要呢？2004年12月10日，他在剑桥的办公室对我说了如下的话：“别人认为黑洞理论更重要，因为它已被接受，但我认为无边界设想更重要。”

他的一生除了在科学前沿攻城略地外，就是应邀到全球讲学。此外，他还亲自上天做零重力飞行，也曾乘潜水艇下到海底，目前正准备做太空旅行。1982年，我建议他访问中国科技大学并帮助他联系，促进了他1985年的首次访华。2002年和2006年他又第二次和第三次来华访问，并且由我陪同和翻译。2006年3月7日，霍金在他任职的基斯学院单独邀请我上席晚宴，我们在最轻松的气氛中交谈了3小时，为他第三次访华做仔细计划。他深情地回忆自己当年访问合肥、北京和杭州的情景。在本书中他选用我在天坛为他第3次访华时拍摄的留影。始建于1420年的天坛，是世界上最大的祭天建筑群，也是北京的城市标志。在他一生中，记者和随行人员在全球为他拍的照片何止万千，他特别选用了这么一张，可见他对中国留下多么深刻的印象。

霍金是剑桥这个孕育了牛顿、达尔文、麦克斯韦、狄拉克等无数学者的学术圣地和1970年代的时空交汇点涌现的智慧英雄。如果我们以大尺度来看宇宙，也只有这一流人物及业绩和星空同在。

吴忠超

2013年8月26日于杭州望湖楼

第一章
童年
CHILDHOOD



我的父亲弗兰克出生于英格兰约克郡的佃农世家。他的祖父，即我的曾祖父约翰·霍金曾是一位富庶的农人，可惜他购进了太多农场，而在上世纪初农业不景气时破产。他的儿子罗伯特——我的祖父试图帮助他的父亲，但自己也破产了。幸运的是，我的祖母在巴勒布里奇拥有一幢房子，她在那里办学，并由此获得微薄收入。这样他们就能设法送自己的儿子去牛津学习医学。我的父亲赢得过一系列奖学金和奖金，除去自己花销，还能节余一些钱寄给父母。后来他进入热带医学研究领域，并在

1937年旅行到东非作考察研究。二战开始时，他作了一次横跨非洲的陆路旅行，到达过刚果河，然后乘船回到英格兰，志愿做军事服务。然而，别人告诉他，他从事的医学研究更有价值。

我母亲出生于苏格兰的邓福姆林，是一位家庭医生的八个子女中的老三。老大是患唐氏综合症的女孩，她独自与保姆生活直到13岁死去。在我母亲12岁时全家搬到南部的德文。和我父亲的家庭一样，她的家庭连小康都算不上。尽管如此，他们也设法把我母亲送到牛津上学。从牛津毕业之后，她从事过不同职业，包括她不喜欢的税务稽查员。后来她放弃这个工作成为一名秘书，于是在二战早期邂逅了我的父亲。

我出生于1942年1月8日，正是伽利略去世三百周年的忌日。然而，我估计这一天出生的大约有二十万个婴儿，但我不知道他们之中是否还有其他人后来对天文学感兴趣。



我父亲和我



我母亲和我

尽管我的父母住在伦敦，我却是在牛津诞生的。这是因为在二战期间，德国人同意不轰炸牛津和剑桥，以换取英国人不轰炸海德堡和格丁根的承诺。可惜这类文明的安排不能被扩展到更多的城市。

我们住在北伦敦的海格特。我的妹妹玛丽在我诞生之后的18个月出生。我听长辈说，我并不欢迎她的到来。我们整个童年时期关系都有些紧张，部分原因是我们俩的年龄差距微小。然而，成年后，由于各走各道，这些紧张都消弭于无形。她成为一名医生，这使我父亲很高兴。

我的妹妹菲利帕在我快5岁时诞生，这个时候我就能较清楚地明白发生了什么。我能记得盼望着她的来临，这样我们就可以三个人一起玩

游戏。她是一个脾气急峻、悟性很高的小孩，而我总是尊重她的判断和意见。我的弟弟爱德华是晚很多才被我家收养的，那是在我14岁时的事，所以他几乎没有进入我的童年生活。他和我们其他三个孩子非常不同，是完全非学术、非智力型的，这或许对我们是一件好事。他是一个相当难缠的小孩，但是人们禁不住喜欢他。他死于2004年，死因永远无法确定；最可能的解释是他用于翻修其公寓的胶发出的烟雾使他中毒。



玛丽、菲利帕和我



我和同胞姐妹在海滩上

我最早的记忆是站在海格特的拜伦宫学校的托儿所嚎啕大哭。我周围的所有小孩都在玩似乎非常美妙的玩具，而我想参与进去。但是我只有两岁半，这是我第一回被放到我不认识的人中间，我很害怕。我认为我的父母对我的反应颇为惊讶，因为我是他们的第一个孩子，而且他们依从

儿童发育教科书，书上讲孩子在两岁时就应该准备开始社交。不过他们在这个可怕的上午之后即把我带走，在一年半的时间里不再把我送回拜伦宫。

那时，也就是二战时期以及战后不久，海格特是一些科学家和学术界人士居住的区域。（在另一国家他们会被称作知识分子，但是英国人从不承认有什么知识分子。）所有这些父母都把孩子送进拜伦宫学校，这是一所当时非常先进的学校。

我记得我对父母抱怨说，这所学校从未教我任何东西。拜伦宫的教育者们不相信那时被认可的灌输教育法。相反地，你被假定自己学习读书而没有意识到是被教的。我终于到相当晚的八岁才学会阅读。我的妹妹菲利帕被用更传统的方法教会阅读，四岁时即能阅读。但那时，她肯定比我聪明。

我们住在一幢高大的、狭窄的维多利亚风格的房子里，这是我父母在二战时期以非常便宜的价格购置的，当时人人都以为伦敦将被炸平。事实上，一枚V-2火箭就落到离我们家只有几间房子远的地方。当时我和母亲、妹妹都出门了，只有父亲在家。幸运的是，他没有受伤，而房子也没有受到重创。但是在后来许多年路上留下了一个大弹坑，我经常和朋友霍华德在那儿玩，他住在另一个方向和我们隔着三个门的房子。因为霍华德父母不像其他我认识的所有朋友的父母，不是知识分子，所以他对我而言是一种启示。他进郡立学校，而不是拜伦宫，而且他通晓足球和拳击，这都不是我父母梦寐以求地追随的运动项目。





伦敦海格特我们的街道

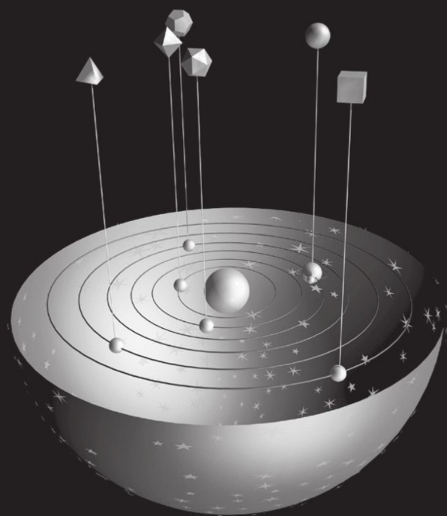
另一个早期回忆是我得到的第一组火车玩具。二战时英国不制造玩具，至少不为国内市场制造。但是我对火车模型有强烈兴趣。父亲试图给我造一列木质火车，但它没有使我满足，由于我需要某种自己能运动的东西。于是他搞到了一列二手的发条火车，用烙铁修理好，在我快3岁时送给我作圣诞礼物。那列火车走得不很好。不过我父亲在二战刚结束时去了趟美国，当他坐玛丽皇后号回来时，他给我母亲带了一些尼龙，那是当时在英国得不到的。他为我妹妹玛丽带回一个玩偶，它能一躺下来就闭上眼睛。而他给我带了一列美国玩具火车，还包括排障器和八字轨道。我还记得在我打开盒子时的激动。

必须上发条的发条火车已经非常好了，但我真正想要的是一列电动火车。我时常花费几个小时观看海格特附近克劳奇恩德的火车模型俱乐部的设计。我朝思暮想有一列电动火车。终于，当我父母都出门到什么地方去时，我抓住机会从邮局银行取出非常有限的钱，这些钱是人们在特殊场合例如受洗时给我的。我用这钱买了一列电动火车。但是令人非常沮丧的是，它也运行得不很好。我应该将它退回去要求商店或者制造厂家更换一个新的，但当时的看法是，买某种东西是一种特权，如果东西有毛病只得自认倒霉。于是我花钱去修理马达，甚至修理之后它也一直未能运行得很好。



我和我的火车玩具

后来，在我十几岁时，我建造了飞机模型和船模型。我的手工从来就笨拙，但我是和学友约翰·麦克列纳翰一起做的，他比我灵巧得多，他的父亲在自己家里有车间。我的目标总是建造一个我能控制的运行的模型。我不在乎它们外表如何。我想正是同一种动因驱使我和另一位学友罗杰·芬尼豪一道发明了一系列复杂的游戏。有一种制造业游戏，附有生产不同颜色产品的工厂，运输这些产品的公路和铁轨以及股票市场。有一种战争游戏，在包括4000个方块的板上玩，甚至还有封建游戏，在这游戏中每一个玩家都是有家谱可查的整个王朝。我以为这些游戏，还有火车、船舶和飞机都是来自要了解系统如何运行和如何控制它们的强烈愿望。从我开始攻读博士学位开始，我对宇宙学的探索满足了这个需求。如果你理解宇宙如何运行，在某种程度上，你就控制了它。



第二章
圣奥尔本斯
ST.ALBANS



我们在圣奥尔本斯的房子

1950年，我父亲的工作地点从海格特附近的汉姆斯特德搬到位于伦敦北面边缘的米尔山的新建的国立医学研究所。对他而言，与其从海格特往外通勤，不如全家搬离伦敦而向里通勤上班。因此我父母在圣奥尔本斯的教堂城买了一幢房子，这个城大约在米尔山以北十英里、伦敦中心以北二十英里的地方。这是一幢维多利亚风格的巨宅，有几分优雅和别致。我父母购买此房时并不富裕，在我们搬进去之前他们不得不做许多装修。此后我的父亲，凭着他那约克人的脾气，拒绝再花钱做任何进一步的修缮，却也尽力不使它老化并不停重新上漆。但这是一桩大房子，而他干这类事情比较笨拙。然而，由于这幢房子建造得很坚固，所以经受得住这种忽视。当1985年我父亲病重时将它出售了，这是他死前一年的事。我最近再次看到了这所房子——似乎它从未被修理过。

这房子是为带佣人的家庭设计的，因而在食品储存室有块指示板显示在哪个房间有人按铃。我们当然没有佣人，但我最早的卧室是一个L形的小房间，过去那间应是女仆的房间。我要这间房子是因为我表姐萨拉的建议，她比我稍大一些，而我很佩服她。她说我们在那里可以玩得很开心。这个房间的一个吸引人之处是可以从窗户往外爬到自行车棚的顶部，再从那里回到地面。

萨拉是我母亲大姐珍妮特的女儿，她被培养成一名医生并和一名精神分析学家结婚。他们住在再往北五英里的一个乡村哈彭登，房子和我们的很像。离他们家近一些正是我们搬到圣奥尔本斯的原因之一。和萨拉接近使我获得意外的好处，就是我可以经常乘公共汽车去哈彭登看望她。

圣奥尔本斯自身紧挨着维鲁拉米恩古罗马城市废墟，后者是不列颠仅次于伦敦的最重要的罗马人定居地。它在中世纪拥有过全不列颠最富有的修道院。它是环绕着圣奥尔本斯的圣陵修建的，据说这位罗马百夫长是在不列颠因基督教信仰被处死的第一人。修道院遗留下的一切就是非常大并相当丑的教堂和陈旧的入口建筑物，后者是我后来入学的圣奥尔本斯学校的一部分。和海格特或者哈彭登相比，圣奥尔本斯有点乏味和保守。我父母在那里几乎没有朋友。这部分是他们自身的过错，由于他们本性上相当孤独，尤其是我父亲。但是这也反映了不同类别的群体；确实，我在圣奥尔本斯学友的父母中无人称得上是知识分子。

我们家在海格特似乎是相当正常的，但在圣奥尔本斯我以为我们肯定被认为是古怪的。我父亲的行为加深了这种看法：只要能省钱，他对外表毫不在乎。他年轻时家里非常贫困，这给他留下了长久的印迹。他不能容忍花钱图自己舒服，甚至在以后岁月里他能做得到时也依然如此。他拒绝安装集中供热，尽管他冻得很难受。他宁可在通常的衣服之外罩上几件毛衣和睡袍。可是他对别人却异常慷慨。

1950年代他觉得我们买不起一辆新轿车，于是他就买了一辆战前的伦敦出租车，他和我建了一座尼森小屋作为车房。邻居被这个行为激怒了，但他们无可奈何。就和大多数孩子一样，我为父母感到难为情，但是他们毫不在乎。

我的父母为度假买了一辆吉普赛人大篷车，把它安放在奥斯明顿米尔斯的场地上，其地邻近韦茅斯，在不列颠南海边上。吉普赛的原主曾

把这大篷车装修得美仑美奂。我父亲将它全部漆成绿色，使之不那么引人注目。这大篷车有一张父母睡的双人床，还有在下面给孩子们睡的密柜，但我父亲利用军队备用担架把它改成带梯子的双层床，而我们父母睡在隔壁的军队备用帐篷中。一直到县政会在1958年最终设法把这大篷车移走为止，我们都在那里过暑假。





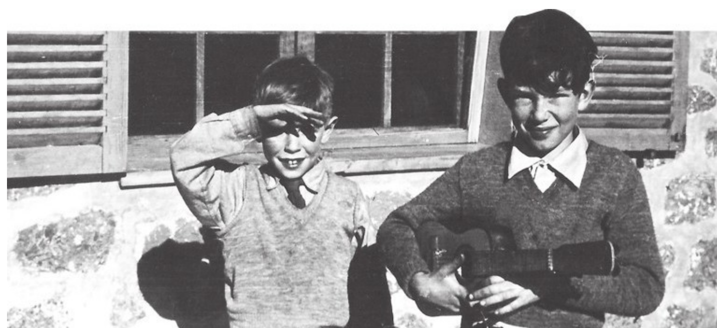
我们的吉普赛大篷车

刚来到圣奥尔本斯时，我被送到高等女校，尽管名为女校，它也收10岁以下的男孩。然而，在那里一个学期后，我父亲作了几乎一年一度的非洲之旅，这次旅行为期相当久，大约四个月。我母亲不喜欢在这么长时间一人单独留下，于是她带着我的两个妹妹和我去访问她的学友贝里尔。贝里尔和诗人罗伯特·格雷夫斯结婚，他们住在马略卡的西班牙岛上一个名叫德亚的村庄。这才是战后五年，西班牙的独裁者弗朗西斯科·弗

朗哥，这位希特勒和墨索里尼的曾经同盟仍然在位。（事实上，他此后还掌权达二十年之久。）尽管如此，在战前曾经是共产主义青年团员的我母亲，携带三个年轻孩子坐火车坐船抵达马略卡。我们在德亚租了房子，并在那里度过了美好时光。我和罗伯特的儿子威廉同请了一位私人教师。



我们在马略卡德亚的临时的家



我（左）和罗伯特·格雷夫斯的儿子威廉

这位私人教师是罗伯特的门生，他对为爱丁堡节撰写剧本比对教育我们更感兴趣。为了让我们不闲着，他要我们每天读一章圣经并且就它写一篇文章，意思是教我们领会英文之美。在我离开之前我读了创世记全部和出埃及记的部分。从这次训练中我学会的一个主要东西是不能用“以及”开句。当我指出圣经中大多数句子都以“以及”开头时，我被告知，从詹姆斯王之后英语已经改变。我争辩道，既然如此，何必让我们读圣经？

但是这一切都是枉然。罗伯特·格雷夫斯当时非常热心于圣经中的象征主义和神秘主义。因此，对于我们而言，无人可以求助。



在不列颠节开始之际我们返回英国。这个节是工党政府想再造1851年世博会辉煌的想法。那回世博会是阿尔伯特王子组织的现代意义上的首次世博会。这次节庆祝不列颠从二战和战后的艰辛中解脱出来。它在泰晤士河南岸举行，新的建筑形式和新的科学技术让我大开眼界。然而，这个展览会是短命的：那年秋天，保守党赢得选举并将其关闭。

十岁时，我参加了所谓的11加考试。这是一种智力测验，把适合学术教育的儿童挑选出来，其余多数则送去非学术的中学去。11加系统使一些劳工阶级和中下层的孩子进入大学并获得优越的地位，但是有人抗议在十一岁时一选定终生的原则，这种抗议主要来自中产者父母，他们发现孩子被送进与劳工阶层为伍的学校。1970年代这种系统在很大程度上被抛弃，以让路于综合性教育。

1950年代英国教育是等级森严的。不仅是学校被分成学术的和非学术的，而且学术型学校又进一步分成A、B和C组。这对A组学生来讲是很成功的方法，但对B组学生就没那么好，而对不受鼓励的C组学生就很糟糕。基于11加考试成绩，我被放在圣奥尔本斯学校的A组。但是第一年过后，凡是在班级名次后于第20名的都被分配到B组去。这对他们的自信心是毁灭性的打击，有些人永远不可能恢复。我在圣奥尔本斯的头两个学期，分别为第24和第23名，但在第三学期为第18名。这样我在年终刚好逃脱被降下去的命运。

我13岁时，父亲让我去试考西敏学校，不列颠主要的“公学”之一（在美国这被称为私立学校）。正如我提到的，在那个时期，在教育中按照阶级界限有明确的划分，而我父亲觉得这样的学校赋予我的社会体面对人生有益。我父亲相信在他的生涯中正是因为缺乏风度和社会关系而被忽视，而有些能力较差的人则可能更加顺利。他觉得别人并没有那么好，但因为有好的背景和关系而爬到他上面，他为此曾愤愤不平。他也经常警告我提防这类人。

因为我父母并不富裕，为了进西敏学校我必须赢得奖学金。然而，我在奖学金考试时生病了，所以没有考。于是，我留在了圣奥尔本斯学校，在此我得到比在西敏学校，即使不是更好，也肯定是同样好的教育。我从未发现我缺乏社会体面会成为障碍。但我认为物理学和医学有些不同。对于学物理的，你上哪个学校、结交了哪个人都不重要。只有你做了什么才要紧。

我在班级里从未列在前面一半。（那是一个所有学生都非常聪明的班级。）我的作业总是非常不整洁，我的老师对我的书写感到绝望。但是我的同学给我起了“爱因斯坦”的绰号，看上去他们看到了一些好征兆。我12岁时，一位朋友和另一位朋友用一袋糖果打赌说我将一事无成。我不知这个赌是否尘埃落定，如果已经落定，赢家究竟是哪一方。



我（右）16～17岁时

我有六七个亲密朋友，迄今还和他们中的多数有接触。我们习惯于进行长时间的讨论和辩论，论题所涉极为广泛，从无线电控制模型到宗教，从通灵学到物理学。我们谈论的一件事是宇宙的起源，它是否需要上帝去创生它并使它运行。我听说过从遥远的星系来的光波向光谱的红端移动，而这被假定表示宇宙正在膨胀。（向蓝端的移动就表明它正在收缩。）但是我肯定，红移应该有某种其他原因。一个基本不变的永续的宇宙似乎更自然得多。我猜想，也许光在向我们来的路途中仅是疲倦了，变得更红。在我攻读博士大约两年后，我才意识到自己过去错了。

我父亲从事热带病研究，而他通常把我带到他米尔山的实验室。我很喜欢这个，尤其是通过显微镜做观察。他还常带我进昆虫室，他在里面关着一些受热带病感染的蚊子。这使我很忧虑，因为看起来总有一些蚊子随意飞出。他异常勤奋，称得上是献身于研究了。

我向来对事物如何运行非常感兴趣，因此我通常会把它们拆开看如何工作的，但是我并不擅长再将它们重新组装回去。我的实际动手能力

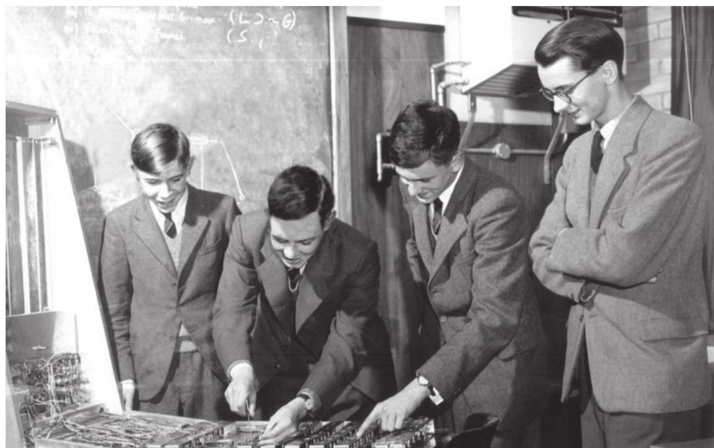
总不能和我的理论探索能力相匹配。我父亲鼓励我在科学上的兴趣，他甚至指导我学数学，直到超出他的知识范围为止。有这样的背景，有我父亲的工作做榜样，我认为自己作科学研究是非常自然的。



我父亲在一次热带病实地考察研究中

当我进入中学的最后两年，我想专攻数学和物理。学校有一位非常启发人的数学教师塔他先生；而且学校刚建立了一间新的数学室。爱好数学的同伴都将它当成自己的教室。但是我父亲认为除了做教师，学数学的找不到任何工作，所以极力反对。他实在希望我去从事医学，但我对生物学提不起兴趣；对我而言，生物学似乎太描述性了，并且不够基本。它在学校中的地位相当低。最聪明的孩子学数学和物理，不太聪明的学生物学。

我父亲知道我不想学生物学，不过他使我学化学并学一点数学。他觉得这样会使我的科学路子更宽些。现在我是一名数学教授，但自从17岁离开圣奥尔本斯学校起，从未上过正式的数学课。我现在通晓的数学全凭在研究工作中自己汲取。我在剑桥通常指导本科生，只要在课程上比他们提前一周预看即可。


在圣奥尔本斯学校，我在最左边

在学校里物理学总是最枯燥的学科，因为它是这么容易而显然。化学则有趣得多，因为一直发生诸如爆炸之类的意外。但是物理学和天文学给了我们理解我们从何而来和我们为何在此的希望。我要对宇宙的奥秘寻根究底。也许在小的程度上我已经成功地做到这点，但仍有大量我还想知道的奥妙。

第三章
牛津
OXFORD

我父亲非常希望我进牛津或剑桥。他本人上过牛津的大学学院，所以他认为我应申请那里，因为我会有较大的机会被录取。大学学院在那时没有数学研究员，这就是他要我学化学的另一个原因：我可以尝试获取自然科学的而非数学的奖学金。

那一年家庭的其余成员都要去印度一年，而我必须留下准备A水平和大学入学考试。我待在约翰·汉弗莱一家在米尔山的房子里，他是我父亲在国立医学研究所的同事。房子里有地下室，地下室里有约翰·汉弗莱父亲制造的蒸汽机和其他模型，而我在那里度过了许多时光。我在暑假时去印度看望家人，他们住在勒克瑙的一幢房子里，那是从印度北方邦前首脑租来的，他由于贪污而受人唾弃。我父亲在那里时拒绝吃印度食品，所以他雇了前英属印度军队厨师和送信人为他料理英国伙食；我宁愿吃某种更刺激的东西。

我们去克什米尔并且在斯利那加的湖上租了一艘船屋。我们在雨季去了那里，走的是印度军队早先修的山路，某些地段被雨冲毁（正常的道路通过停火线进入巴基斯坦）。我们从英国带来的小轿车不能应付比三英寸更深的水，所以只好请一名锡克族卡车司机拖引。

我的校长认为我太年轻了，不适合去尝试牛津，但是我在1959年3月和其他两个在学校中比我高一年级的小孩一道去那里考奖学金。我相信我考得很糟，在实验考试时大学讲师来到我身边和其他学生谈话而不理我时，我非常沮丧。从牛津回家后几天，我收到电报说我得到了奖学金。



我为赛船俱乐部掌舵

我17岁，其他和我同年级的大多数学生都在军队服役过，而比我年长许多。我在第一年和第二年的一段时间觉得相当寂寞。在第三年，为交到更多朋友，我作为掌舵手加入赛船俱乐部。可是我的舵手生涯相当糟糕。因为牛津的河流太狭窄了，不能并行赛船，他们颠簸着进行比赛，八条船一艘接在另一艘之后，而每一位舵手必须掌握起始线使自己的船和前头的船距离恰好。



赛船俱乐部在休息

在我第一次比赛中，发令枪响时我让船离开起始线，但它绊住了舵线，结果我们的船离开了航道，因此我们丧失了资格。后来我和另外八

条船之一对头相撞，但在这种情形下我至少可宣布这不是我的过错，因为我有超越其他八船的路权。尽管我作为舵手不成功，但那年我结识了更多朋友而快乐得多。



赛船俱乐部在游玩

那个时期在牛津占主导的看法是非常不用功。你要么是不费吹灰之力而非常卓越，要么接受自己能力有限而得到第四等。因为用功而得到较好等级被视为一个“灰人”的标志，在牛津词汇中这是最坏的诨名。

那个时候的学院自认为负有学生父母的责任，这意味着他们管教学生的道德。所以同一学院里的学生都是同一性别的，大门在午夜都要上锁，到时所有访问者——特别是异性——都必须离开。午夜过后，如果想离开，就必须攀越有铁尖的高墙。我的学院不想让学生受伤，所以在铁尖间留下空隙，因此很容易攀越出去。你如果被发现和异性同学在床上，那就是另一回事了：你就当场被开除。

把法定年龄降低到18岁和1960年代的性革命改变了一切，但那是我上牛津之后的事了。

那个时期，物理课的安排方式使得不做功课特别容易。我进大学之前考试了一次，然后在牛津待了三年，只有一次终考等着我们。我计算过一次，我在那里的三年期间大约只用功一千小时，平均每天一小时。我对自己懒惰并不感到自豪，但那时我的态度和多数同学并无二致。我们倾向于绝对厌倦和觉得没有任何东西值得努力追求。我患病的一个后果就

是把这一切都改变了。当你要面临夭折时，你就意识到生命是值得过的，因为有很多事情等你去做。

因为我没有准备，我计划做理论物理问题，并避免需要事实知识的问题来通过终考。然而，由于神经紧张，考试前夕我根本无法入眠，所以考得不是很好。我的成绩处于第一等和第二等的边缘上，我还得让考官面试以确定我应该得第几等。他们在面试时问及我的未来计划。我回答道我要做研究。我告诉他们，如果你给我第一等，我就去剑桥。如果得到第二等，就留在牛津。他们给了我一等。

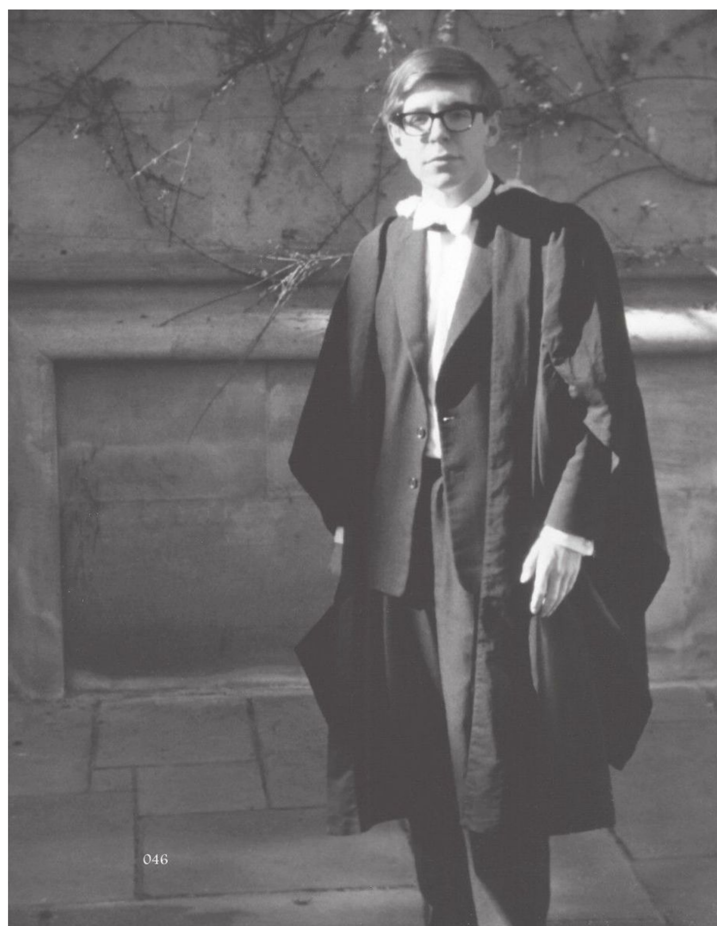
万一我不能做研究，作为后备计划，我已经申请当公务员。因为我对核武器有反感，不想与国防有任何相干。因此我把在公务部门做事（那时是照管公共建筑物）或者在下议院任书记员列为优先选择。在面试时有一件事变得很清楚，那就是我根本不知道书记员是做什么的，尽管如此，我通过了面试，余下的一切就是一次笔试。不幸的是，我全然忘记并错过了笔试。公务员遴选委员会给我写了一封很友善的信，说我明年可以再试，他们不会对我有成见。没有成为一名公务员是我的幸运。如果那样的话，我就无法应付我后来的残疾所带来的不便。

我终考后的长假中，学院提供一些小额旅行资助。我以为我想要去的地方越远，则获得旅行资助的机会越高。于是我说我要去伊朗。我和一位名叫约翰·埃尔德的同学一道出发，他去过那里并通晓波斯语。我们坐火车抵达伊斯坦布尔，然后到东土耳其附近亚拉腊山的埃尔祖鲁姆。在此之后，火车进入苏联领土，我们只得坐载满鸡羊的阿拉伯汽车去大不里士，然后到达德黑兰。

在德黑兰约翰和我各奔前程。我和另外一个同学往南旅行到伊斯法罕和波斯波利斯，后者是古波斯国王的首都并被亚历山大大帝洗劫过。然后我穿越中央沙漠到达马什哈德。

在归途中，我和旅伴理查德·蔡因为保因扎赫拉地震所阻。这是一场7.1级的地震，多于一万两千人死亡。我肯定是在靠近震中的地方，但是由于生病以及在伊朗公路颠簸的汽车上，所以我对此一无所知。因为我们不通晓当地语言，在大不里士的几天我们甚至都不知道这次灾难，那时我正从严重的腹泻和因被甩到汽车前座肋骨断裂中康复。直到到达伊斯坦布尔我们才知道发生了什么。

我给父母寄了一张明信片，他们在急切地等待我的只言半语已经有十天了。他们上一次得到我信息是在我离开德黑兰向灾区出发的时候，那是地震发生的当天。





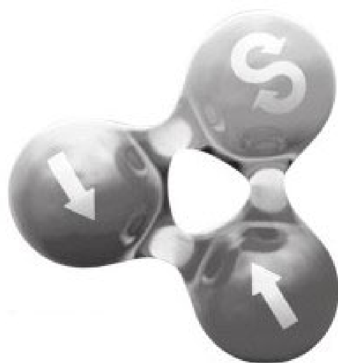
从牛津毕业

第四章
剑桥
CAMBRIDGE

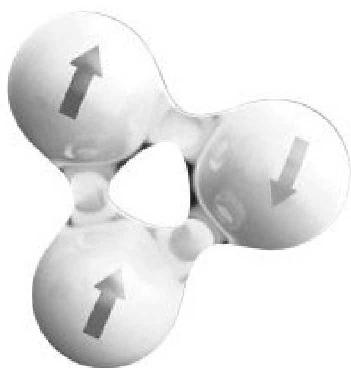
1962年10月，我到达剑桥读研究生。我申请跟随弗雷德·霍伊尔做研究，他是当时英国最著名的天文学家，稳态理论的主要倡导者。我这里讲天文学家，因为宇宙学在那时几乎不被承认为正当的领域。由于和霍伊尔的学生贾扬·纳里卡一道上过夏季课程受到了启发，我认为这正是我要从事研究的领域。然而，霍伊尔已收有足够多的学生，我很失望地被分配给我从没听说过的丹尼斯·西阿玛。

这也许是最好的。霍伊尔经常外出，他可能不会较多地注意我。而西阿玛却常在近旁，随时可以和我交谈。我对他的很多思想持异议，尤其是关于马赫原理，即物体的惯性应归因于宇宙中所有其他物体的影响的思想，但是他的思想激励我发展自己的图像。

在我开始研究时，宇宙学和基本粒子物理学似乎是最激动人心的两个领域。后者是活跃的快速改变的领域，吸引了大多数最好的头脑，而宇宙学和广义相对论停滞在1930年代的状态。理查德·费恩曼，这位诺贝尔奖获得者和二十世纪最伟大的物理学家之一，惊人地记述过他于1962年在华沙参加广义相对论和引力会议的经历。他在致妻子的信中写道：“我从会议一无所获。因为没有实验，这个领域不活跃，所以很少最优秀的人在此耕耘。其结果是这里有一大堆傻瓜（126名），而这对我的血压很不利……请提醒我不要再参加任何引力会议！”



当然，在开始做研究时，我对此一无所知。但是我觉得那时研究基本粒子太像搞植物学了。量子电动力学——制约化学和原子结构的光和电子的理论在1940和1950年代就完成了。现在，注意力已转移到原子核中的粒子之间的弱核力和强核力，但类似的场论似乎无法解释它们。的确，特别是剑桥学派认为，不存在什么根本的场论。取而代之，一切都被么正性——也就是概率守恒——以及粒子散射中的某种特征模式所确定。当时认为这种方法会成功，而我却记得弱核力的统一场论的首批尝试被嗤之以鼻的场景，而后者最终取代了前者，现在事后看来，这一切很了不起。现在人们已经忘记了解析S矩阵的工作，而我很庆幸自己没开始做基本粒子的研究。如果那样的话，我没有任何研究成果可以存活。



另一方面，宇宙学和引力的领域被人忽视日久，当时却已悄然成熟，可以发展了。和基本粒子不同，它存在一个定义很好的理论——广义相对论——但这个理论被认为是不可解决的困难。人们在找到描述该

理论的爱因斯坦方程的任何解时如此高兴，他们甚至不去询问该解具有什么物理意义，如果它具有物理意义的话。这就是费恩曼在华沙遭遇到的广义相对论的旧学派。富有讽刺意味的是，华沙会议也以广义相对论开始复兴而被历史铭记，尽管我们可以原谅费恩曼当时没有看出这一点。

新的一代进入这个领域，新的广义相对论研究中心出现了。其中两个中心对我尤其重要。一个位于德国汉堡，受帕斯夸尔·约当领导。我从未访问过那里，但我对那里产生的优雅论文赞赏有加，这些论文和早先关于广义相对论的凌乱研究相比，可谓天上地下。另一个中心是赫尔曼·邦迪领导的位于伦敦国王学院的中心。

因为我在圣奥尔本斯或在牛津的非常容易的物理课程中没做多少数学，西阿玛建议我研究天体物理。但是既然我未有机会师从霍伊尔作研究，我也就不想研究某种枯燥和缺乏想像力的东西，诸如法拉第旋转。我既然来到剑桥研究宇宙学，那么宇宙学就是我决心要研究的。于是我耽读广义相对论的老教科书，每周都和西阿玛的其他三名学生前往伦敦的国王学院听课。我对词句和方程都明白，但我对这个学科没有感觉。

西阿玛把我引导到所谓的惠勒-费恩曼电动力学。该理论是说电和磁是时间对称的。然而，当一个人开灯时，正是宇宙中其他所有物质的影响使光波从灯泡往外行进，而非从无限远到达并终结于灯泡。为了使惠勒-费恩曼电动力学能行得通，从灯泡往外行进的所有光应被宇宙中其他物质吸收。这在稳态宇宙中会发生，在那里物质密度会保持常数，而在随着宇宙膨胀密度降低的大爆炸宇宙中则不会发生。人们声称，这是我们生活在一个稳态宇宙中的另一个证明，如果仍然需要证明的话。

据说，这能够解释时间之箭，这是无序化日增，以及为何我们记住过去而非将来的原因。1963年在康奈尔大学举行了一次关于惠勒-费恩曼电动力学和时间之箭的会议。费恩曼如此厌恶关于时间之箭发表的废话，他拒绝将自己的名字印在会议文集中。他只被指为X先生，但每个人都知道那是谁。

我知道霍伊尔和纳里卡已经完成了膨胀宇宙中的惠勒-费恩曼电动力学，还继续去阐述时间对称的新引力论。1964年，霍伊尔在皇家学会的一次会议上首次公开了这一理论。我参加了演讲会，我在问答阶段说，

在稳态宇宙中，所有物质的影响会使他的质量无限大。霍伊尔问我为什么这么讲，而我回答说我计算过它。所有人都以为我是指在这演讲期间我已经做完了心算，而事实上我和纳里卡共用一间办公室并且我预先看到了论文草稿，这使得我可以在会议之前去作计算。

霍伊尔非常愤怒。他正想建立他自己的研究所，并且威胁说如果他得不到钱，就参与往美国的大脑流失潮。他以为有人煽动我去破坏他的计划。然而，他成立了自己的研究所，而且后来还给我一个工作，因此他显然并不对我怀恨在心。

我在牛津的最后一年就注意到，我变得越来越笨拙。在摔下几个台阶后我就去看医生，但他所说的一切只是“别喝啤酒”。

我搬到剑桥后甚至变得越发笨拙。圣诞节期间，我在圣奥尔本斯的湖上滑冰时跌倒，爬不起来。我母亲注意到这些问题，并把我送到家庭医生那里。他把我转到一个专家那里，在我21岁生日刚过不久，我就进了医院进行检查。我在医院里待了两周，期间做了种类繁多的检查。他们从我手臂取出肌肉样品，把电极嵌到我身上，然后把射电波不能透过的一些流体注入我的脊柱，然后使床倾斜，用X射线看这些流体从上往下流动。做了这一切后，除了告诉我没患多发性硬化症以及是非典型的情形外，什么都没讲。然而我推断，他们预料病情会继续恶化。他们除了给我一些维生素外束手无策，尽管我能觉得他们预料这些药片没多大用处。我没有问更多细节，显然他们没有什么好事可告诉我。

意识到我患了可能在几年内致死的绝症对我是有点震惊。这样的事怎么会落在我头上呢？然而，当我在医院时，我见证了在我对床上一位有些认识的男孩死于血癌。很清楚有人比我更不幸——至少我的状态没有使我觉得患病。我感得有点自怜时，就立即记起那个男孩。

不知道我将来会发生什么或者这个病会发展多快，我处于一团迷雾之中。医生们让我回到剑桥继续我刚开始的广义相对论和宇宙学研究。但是因为我没有太多数学背景，所以研究没有进展——毕竟，当我知道我也许活不到完成我的博士论文时很难专心致志。我觉得有点悲剧人物的味道。

我开始听瓦格纳的音乐，但杂志文章报道说我那时还酗酒，就未免是夸大其词。一旦一篇文章这么写，其他文章就抄过去，因为它可以编一个好故事，而最终人人都相信任何出现在出版物中这么多次的东西必然是真的。

然而我当时的梦想是相当让人困扰的。在我的病症还未得到诊断前，我对生活极其厌倦。似乎没有什么事情值得去做。我出院不久，就做了一个将被处死的梦。我忽然意识到，如果我被缓刑的话，还有很多我能做而值得做的事情。另外一场我做了很多次的梦是，我要牺牲自己的生命去救别人。毕竟，如果我反正都要死，不妨做一些好事。

但是我没死，尽管我的未来总被乌云遮盖，我非常惊讶地发现我享受生活。事件发生根本变化的原因是我和一个名叫简·王尔德的姑娘订婚，我是大约在被诊断为ALS病时邂逅了她。这给我了某种生活的动力。

如果我们要结婚，我就得有一个工作，而要得到工作，我必须完成我的博士论文。因此我在一生中头一次开始用功。令我惊讶的是，我发现我喜欢用功。尽管也许称之为用功是不公平的。某人一度说过科学家和妓女都为自己享受的工作得到报酬。

为了在我攻读期间养活自己，我向龚维尔和基斯学院申请研究奖学金，这是一所剑桥大学内的学院。因为我日益严重的笨拙使我无论是书写还是打字都很困难，希望简能打印我的申请表。但等她来剑桥看我时，她的手臂骨折了并打了石膏。我必须承认，我本应给她以更多的关心。然而，受伤的是她的左臂，所以在我口授下，她能写好申请书，而由我求其他人打印出来。



和简在剑河上乘方头平底船

在我的申请中我必须给出两个人的名字，他们能为我的研究工作提供推荐书。我的导师建议我应该请求赫尔曼·邦迪充当其中之一。邦迪那时是伦敦的国王学院的数学教授，并且是广义相对论专家。我遇到过他两回，并且他还把我的一篇论文提交给皇家学会会刊发表。在他剑桥的一次讲演后，我请求他提供推荐书，而他茫然地看着我，并说可以，他会的。显然他记不得我了，因为当学院给他去信要推荐书时，他回答说没听说过我。当今有这么多人申请学院的研究奖学金，如果候选者的推荐人中的一个说他不认识他，那就没有机会了。但是，那是平静的时期。学院写信告诉我我的推荐人令人难堪的答复，而我的导师和邦迪联系并帮他回想起来。后来邦迪为我写了推荐书，也许这推荐书太过溢美了。我得到了研究奖学金，并且从那时起一直是基斯学院的研究员。

这奖学金意味着简和我可以结婚，我们在1965年7月成婚。我们在萨福克度过一周蜜月，这是我们能负担得起的。后来我们就去了康奈尔大学的广义相对论暑期班。

那是一个错误的决定。我们待在一间充满带有吵闹小孩的夫妻的宿舍，这使我们的婚姻生活毫不悠闲。然而在其他方面，这次暑期班对我非常有用，因为我遇到了这个领域的许多领袖人物。



我娶了简

当我们刚结婚时，简还是伦敦的韦斯特菲尔德学院的本科生，所以她必须在每周工作日从剑桥去伦敦完成她的学位。我的病症使肌肉越发衰弱，这意味着行路越发困难，而因此我们不得不去找一个位于市中心的住处，使我自己能应付自己的生活。我求助学院，但财务主任告诉我学院的方针是不帮助研究员解决住房问题。因此我们就登记租用正在建造的一组新公寓中的一套，这些公寓位于非常便利的商业中心。（我在几年后发现这些公寓实际上属于我的学院，但他们当时并没有告诉我这些。）然而，当我在美国度夏返回剑桥时，我们发现公寓还未落成。

作为巨大的让步，财务主任同意提供我们研究生宿舍的一套房间。他说："这间房间我们通常每夜收12先令6便士。然而，由于你们两个将住在这房间，我们将要收25先令。"我们只待在那里三个晚上就在离我大学的系大约100码的地方找到了一个小房子。它属于另一个学院，学院将它租给了自己的一名研究员。而那位研究员由于最近搬迁到郊区的一幢房子里了，因此就将这房子在租约余下的三个月期间转租给我们。

就在这三个月间，我们发现在同一条路上有一幢无人居住的房子。一位邻居传话给住在多赛特的房主人并对她说，当年轻人在寻找住房时，她的房子竟然空置着，这简直是丑闻。于是她就把房子租给我们。在那里住了几年之后，我们想购买并修缮它，所以请求我的学院抵押贷款。学院做了调查并确定风险太大，不同意贷款。最终我们从它处得到抵押贷款，而我父亲出钱替我们修缮了房子。

那个时期基斯学院的境况使人联想起C.P.斯诺的小说中的一些情景。在研究员中出现了所谓农民起义以来的最严重的分裂，一些较年轻的研究员联合一起使老研究员落选。存在两个阵营：一方是院长和财务主任，另一方是较进步的一方，后者要求把学院相当的财富较多用于学术的目的。进步的一方利用学院理事会一次院长和财务主任双双缺席的会议选出六名研究员，包括我在内。

我参加的第一次学院会议进行学院理事会选举。其余新研究员已被简要通报要选什么人，而我在对此完全不知情下选举双方的候选者。进步方赢得理事会的绝大多数席位，而院长内维尔·莫特爵士（他后来因凝聚态物理的研究获得诺贝尔奖）愤然辞职。然而，下一任院长李约瑟（多卷本的《中国科学史》的作者）平息了争议，从那后学院一直相对平静。



和我的第一个孩子罗伯特在一起

大约婚后两年，我们的第一个孩子罗伯特诞生。在他出生后不久，我们即带他参加西雅图的一次会议。这又是一个错误的决定。由于我的残疾加重，我对照料婴儿没有什么用，而简在很大程度上却要自个儿应付而备极辛苦。西雅图会议之后我们在美国进行的更多旅行使她精疲力竭。现在，罗伯特和他的妻子卡特里娜还有孩子乔治以及罗斯都住在西雅图，显然这个经历没有给他留下创伤。


简和罗伯特

我们的第二个孩子露西大约三年后出生，她出生于当时作为产科医院的老救济院里。在简怀孕期间由于我们自己的房子正在扩建，所以必须搬到朋友拥有的一处茅草屋顶的农舍暂住。在她出生之前几天，我们才搬回去。

第五章
引力波
GRAVITATIONAL WAVES

1969年，约瑟夫·韦伯报告，利用由两根悬浮在真空的铝棒组成的检测器观测到了引力波暴。当引力波到来时，它会把东西在一个（垂直于波行进）的方向拉伸，而在另一个（垂直于波的）方向压缩。这就使这些棒以它们的共振频率——1660赫振荡，而捆扎在棒上的晶体会检测出这些振荡。1970年代初，我访问了在离普林斯顿不远处的韦伯并检查了他的设备。以我未受训练的眼光，我看不出有什么差错，而韦伯宣布的结果真是惊人。强大的足以激动韦伯棒的引力波暴仅有可能的源应是：一颗大质量恒星坍缩形成黑洞，或者两颗黑洞碰撞并且合并。这些源必须在邻近——在我们的星系内。这类事件的早先估计是大约每世纪一次，但韦伯宣布每天观测到一两次暴。这就意味着，该星系正以一种巨大的速率损失质量，星系存在期不可能一直维持这样的损失率，那样的话现在根本就没有星系留下。

当我回到英国，我认为韦伯惊人的发现需要独立的确认。我和我的学生盖瑞·吉朋斯写了一篇关于检测引力波暴理论的文章，我们在论文中提出更灵敏的检测设计。当看到似乎没人准备去建造这种检测器时，盖瑞和我，采取了对于理论家而言鲁莽的步骤向科学研究会申请建造两台检测器的资助。（因为来自噪声和地球振动的假信号的干扰，观察至少两个检测器结果之间是否符合是必要的。）盖瑞到处搜寻战后剩余物资存放处，要把废弃的减压舱用作真空室，而我则去寻找适当的地点。

最后我们在伦敦的一个塔块的十三层上的科学研究会和有兴趣验证韦伯声明的其他小组开了一次会。（科学研究会不承认迷信。他们以很便宜的价格拿下了这处办公室。）由于存在研究这一项目的其他小组，

盖瑞和我就收回了我们的申请。这可谓因祸得福，逃过一劫！我不断恶化的残疾会使我无望成为实验家。而且个人在实验课题上要留下一点痕迹非常困难。在做一个需要花费多年时间的实验时，个人通常不过是一个庞大团队中的一员。另一方面，一位理论家可在一个下午，或者在我的情形之下，上床之际突然得到一个想法，而独自地或者和一两位同事撰写论文，从而成名。

1970年代以来，引力波检测器已经灵敏得太多了。现代检测器为了检测引力波，利用激光测距来比较成直角的两臂受引力波影响的长度之差。美国拥有这些LIGO检测器中的两台。尽管它们比韦伯的敏感一千万倍，迄今还没有可靠地检测到引力波。我非常高兴我仍是一位理论家。

第六章
大爆炸
THE BIG BANG

1960年代早期在宇宙学中的大问题是宇宙是否有一起始。许多科学家本能地反对这个观念，并因此反对大爆炸理论，因为他们觉得一个创生之点会是科学崩溃之处。人们必须诉诸宗教和上帝之手去确定宇宙如何开始。

因此人们提出了两种可选择的场景。一种就是稳态理论，在该理论中，随着宇宙膨胀，暗物质被连续地创生以使得密度在平均上不变。因为稳态理论需要一个负能量场去创生物质，所以它从未拥有非常坚实的理论基础。这会使它不稳定并容易导致物质和负能量无法控制地产生。但这个理论有一个巨大优点：它能给出确定的能够由观测来检验的预言。

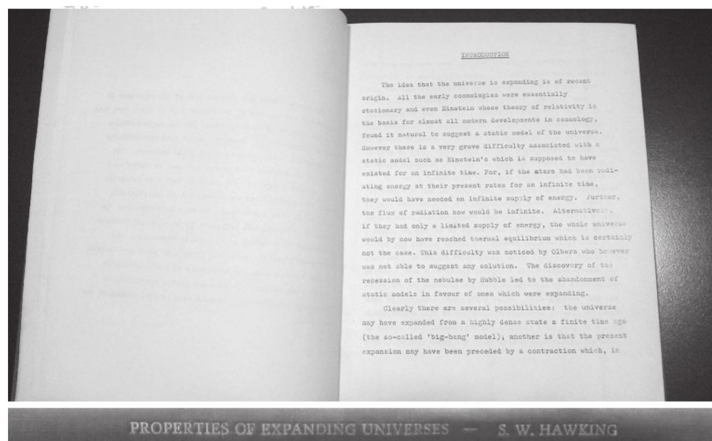
稳态理论到1963年就已经遇到麻烦。卡文迪许实验室的马丁·赖尔的射电天文学小组测量微弱射电源并且发现这些源在整个天空分布得相当均匀。这表示它们可能在我们的星系外面，因为否则的话它们会沿着银河系的方向集中。但是源的数目和源强度对比图跟稳态理论预言不相符合。存在太多的微弱的源，表明源密度在遥远的过去曾经较高。

霍伊尔和他的支持者对这观测提出越来越牵强的解释，但在1965年，微波辐射的微弱背景的发现致命地打击了稳态理论。（这就像微波炉中的微波，但在更低得多的温度，只比绝对零度高出很少的2.7开。）尽管霍伊尔和纳里卡竭尽全力，稳态理论仍无法解释这个辐射。我不是霍伊尔的学生倒也不是坏事，否则我必须去捍卫稳态理论。

微波背景指出，宇宙过去曾经历过热的、稠密的阶段。但它没有证明这个阶段是宇宙的开端。人们可以想象，宇宙经历过早先的收缩相，曾经在很高却有限的密度下从收缩反弹到膨胀。事实上是否如此肯定是一个基本问题，这正是为了完成博士论文我所需要的课题。

引力将物质拉到一起，但是旋转却将其甩开。所以我的第一个问题是旋转是否能使宇宙反弹。我和乔治·埃里斯一起能够证明，如果宇宙是空间均匀的，也就是在空间的每一点上都是相同的，则答案是否定的。然而，两位俄国人，叶弗根尼·栗弗席兹和伊萨克·哈拉尼柯夫宣称证明了，没有准确对称的一般收缩总会导致反弹，而密度保持有限。因为这个结果避免了关于宇宙创生的棘手问题，所以对于马列主义的辩证唯物论是非常合适的。因此它就成为苏联科学家的信条。

栗弗席兹和哈拉尼柯夫属于广义相对论的旧学派，也就是说，他们写下一大堆方程组而试图猜出一个解。但不清楚的是，他们找到的解是否是最一般的。罗杰·彭罗斯引入了新的方法，不需要显明地解爱因斯坦方程，只需要某些一般性质，诸如能量是正的，而且引力是吸引的等。1965年1月，彭罗斯在伦敦的国王学院就这个论题做过课堂讨论。我不在场，但是我从布兰登·卡特那里听到这个消息，我和卡特在银街的剑桥新的应用数学和理论物理系大楼里共用一间办公室。



INTRODUCTION

The idea that the universe is expanding is of recent origin. All the early cosmologies were essentially stationary and even Einstein whose theory of relativity is the basis for almost all modern developments in cosmology, found it natural to suggest a static model of the universe. However there is a very grave difficulty associated with a static model such as Einstein's which is supposed to have existed for an infinite time. For, if the stars had been radiating energy at their present rates for an infinite time, they would have needed an infinite supply of energy. Further, the flux of radiation now would be infinite. Alternatively, if they had only a limited supply of energy, the whole universe would by now have reached thermal equilibrium which is certainly not the case. This difficulty was noticed by Olbers who however was not able to suggest any solution. The discovery of the recession of the nebulae by Hubble led to the abandonment of static models in favour of ones which were expanding.

Clearly there are several possibilities: the universe may have expanded from a highly dense state a finite time ago (the so-called 'big-bang' model); another is that the present expansion may have been preceded by a contraction which, in

PROPERTIES OF EXPANDING UNIVERSES — S. W. HAWKING

我终于完成了博士论文

我起初不理解要点是什么。彭罗斯证明了，濒临死亡的恒星一旦收缩到一定的半径，就会不可避免地存在奇点，空间和时间在奇点处终结。我想，我们确实已经知道，没有任何东西可阻止大质量冷的恒星在

其引力的作用下坍缩，直至它达到无限密度的奇点。但是，事实上我们只对一颗完美地球状的恒星的坍缩解方程，而实际的恒星当然不会是严格球状的。如果栗弗席兹和哈拉尼柯夫是正确的，随着恒星坍缩，对球对称的偏离会增大，会使恒星的不同部分相互错开，因此避免了无限密度的奇点的出现。但是彭罗斯证明了，他们是错误的：对球对称的小偏离不能防止奇点的产生。

我意识到类似的论证可被应用到宇宙的膨胀。在这种情形下，我能证明存在奇点，时空在那里有一个开端。这样栗弗席兹和哈拉尼柯夫就又错了。广义相对论预言，宇宙应该有一个起始，这是不会被教会忽视的一个结果。

彭罗斯和我自己的原始的奇点定理需要假设，宇宙有个柯西面，那就是一个和所有粒子路径相交一次并仅有一次的面。因此可能我们的第一条奇点定理只不过证明了宇宙不具有一个柯西面。尽管有趣，但在重要性上，这根本不能和时间有开端或终结相提并论。因此我着手证明不需要一个柯西面假设的奇点定理。

罗杰·彭罗斯、鲍伯·盖洛许和我在接下的五年中发展了广义相对论中的因果结构理论。我们实际上拥有这整个领域，这种感觉太美妙了。这和粒子物理多么不同，粒子物理学家们争先恐后地采用时髦观念。他们迄今仍然如此。

我把其中一些结果整理成一篇论文，它在剑桥赢得1966年度的亚当斯奖。这是我和乔治·埃里斯合作的专著《时空的大尺度结构》的基础，这部书于1973年由剑桥大学出版社出版。因为它事实上是论时空因果结构的封笔之作，所以该书仍在印行中。时空的因果结构是时空的哪些点能够影响其他点处的事件。我愿意告诫一般读者不要尝试查看该书。它是高度专业性的，它是我把自己当成和纯粹数学家一样严密的那个时期完成的。当今我关心的是是否正确，而非是否正当。因为量子物理的整个领域毕竟都是基于非常靠不住的数学基础上，所以它几乎不可能严密。

第七章
黑洞
BLACK HOLES

黑洞背后的思想要回溯到二百多年前。1783年，剑桥教师约翰·米歇尔在《伦敦皇家学会哲学学报》发表了关于他称为“暗星”的论文。他指出，一颗具有足够大质量并足够致密的恒星会拥有十分强的引力场，甚至光都不能逃逸。任何从这恒星表面发射出的光线在没行进到非常远前就会被恒星的引力拖拽回去。

米歇尔设想，也许存在大量这样的恒星。尽管因为从它们来的光不能到达我们，我们不能看到它们，我们仍然会感觉到它们的引力吸引。这种物体就是我们现在称作黑洞的东西，因为这名符其实：在空间中的黑的洞。几年后，法国科学家拉普拉斯侯爵，显然独立于米歇尔，也提出了类似的设想。足够有趣的是，拉普拉斯只将其收入他的著作《世界系统》的第一、第二版中，而在后来的版本中却将其删除了。也许他判定这是一种疯狂的想法。

无论是米歇尔，还是拉普拉斯，都认为光由粒子组成，和炮弹相当像，可由于引力而速度变缓并落向恒星。这和1887年实现的迈克耳孙-莫雷实验不一致，该实验证明光总是以相同速度行进。直到1915年爱因斯坦阐述广义相对论，才得到引力如何影响光的协调的理论。1939年，罗伯特·奥本海默和他的学生乔治·沃尔科夫以及哈特兰·斯奈德证明，一颗耗尽其核燃料的恒星，如果其质量大于某一确定的大约太阳质量数量级的极限，就自身无法对抗其引力。超过这一质量的烧尽的恒星会向自身坍缩，并形成包含无限密度奇点的黑洞。尽管这些都可以根据爱因斯坦的理论加以预言，但爱因斯坦却从未接受黑洞理论或者说物质能被压缩成无限密度。

后来二战干扰使奥本海默转向研究原子弹。战后，人们对原子和核物理更感兴趣并忽略引力坍缩和黑洞达二十多年之久。

随着1960年代早期类星体的发现，人们对引力坍缩的兴趣被重新唤醒了。类星体是非常致密和具有非常强大的光学和射电的源的极遥远物体。物体落入黑洞是仅有的能够解释在空间这么小的区域里产生这么多能量的貌似有理的机制。人们重新发现了奥本海默的工作并开始研究黑洞理论。

1967年，沃纳·伊斯雷尔得出一项重要结果。他证明，除非一非旋转的坍缩恒星的残余刚好是严格的球形，它所包含的奇点将是裸的，也就是说它能被外界的观察者看到。这就意味着，广义相对论在坍缩星奇点处崩溃了，毁灭了我们预言宇宙其余部分的未来的能力。

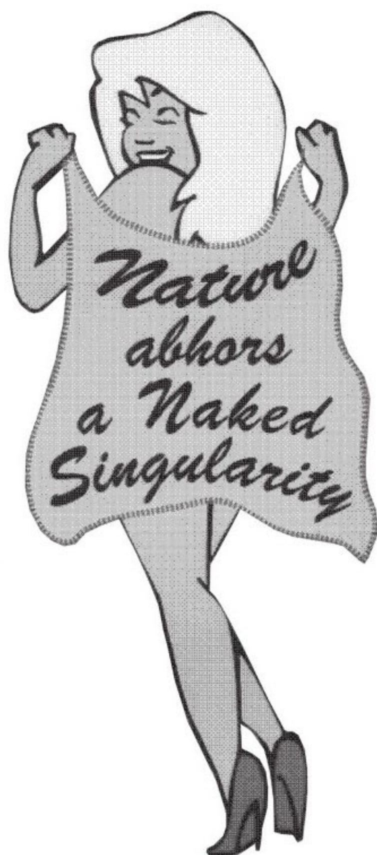
最初，包括伊斯雷尔本人在内的大多数人都认为，这意味着，因为实在的恒星不是严格的球形，它们的坍缩会导致裸奇点以及预见性的崩溃。然而，罗杰·彭罗斯和约翰·惠勒却提出一个不同的解释：一颗非旋转恒星引力坍缩的残余物会迅速地趋向稳定于一个球形状态。他们提出存在宇宙监督：自然是一个道学家，他将奇点隐藏在黑洞中而不被看到。

在应用数学和理论物理系我办公室的门上，我曾有一道保险杆贴纸，上面写着，“黑洞是看不见的。”这使系主任如此恼火，以至于策划把我选为卢卡斯教授，好借以把我移到一间更好的办公室，并亲自把这令人不快的告示从我旧办公室的门上撕掉。

1970年，我女儿露西出生后几天，我关于黑洞的研究尤利卡（我想出来了！）瞬间开始。在我上床的时刻，我意识到，我为奇点定理发展的因果结构理论适合于黑洞。特别是，黑洞的边界即视界的面积总是增加。当两颗黑洞碰撞并合并时，最终黑洞面积比原先黑洞面积之和更大。这个以及詹姆·巴丁、布兰登·卡特和我发现的其他性质暗示，面积正像是黑洞的熵。这会是对于在外面看来具有相同外表的黑洞，在其内部能有多少态的度量方法。但是面积不可能在事实上就是熵，因为那样的话，黑洞还应拥有温度，并会像热体那样发热。正如所有人都以为的，黑洞是完全黑的，并且不发射光或者其他任何东西。

我们解决黑洞理论中大多数主要问题的那个时期是激动人心的，它以1972的莱苏什暑期学校达到高峰。尤其是大卫·罗宾孙和我证明了无毛定理：黑洞会稳定到只由两个数，即质量和旋转表征的态。这再次暗示黑洞拥有熵，因为许多不同的恒星会坍缩而产生一颗拥有相同质量和旋转的黑洞。

这个理论的一切都是在黑洞毫无观测证据之前发展的，这表明费恩曼讲的，活跃的研究领域必然由实验来驱动的说法是错误的。证明宇宙监督假设是一个从未解决的问题，尽管一些去证伪它的企图都失败了。它对于所有黑洞研究都是基本的，所以我对它是真理具有强大的既得利益。因此，就这个问题的结果，我跟基普·索恩和约翰·普列斯基尔打了一个赌。我赢这个赌是困难的；而如果任何人找到一个裸奇点的反例，我输了反倒是相当可能的。事实上，我输了这赌的较早一个版本，因为在措词时没有足够小心。索恩和普列斯基尔对我拿一件T恤作的彩头并不开心。



宇宙学幽默，第一部分：我把“自然厌恶裸奇

点”印在T恤上作为彩头

我们在经典广义相对论上取得如此成功，在《时空的大尺度结构》发表之后，1973年我没有太多事情可做。我和彭罗斯的研究证明了，广义相对论会在奇点处崩溃。这样下一步显然应该是将描写“非常大”的理论，即广义相对论，与描写“非常小”的理论，即量子论相结合。我没有量子论背景，而在那个时期正面进攻奇点定律似乎太困难了。所以作为热身准备，我转而考虑由量子论制约的粒子和场在邻近黑洞时会如何行为。特别是，我极想知道，能存在以在极早期宇宙形成的极微小的太初黑洞为核的原子吗？

为了回答这个问题，我研究量子场会如何从一颗黑洞散射开去。我预料入射波的一部分会被吸收，余下的被散射。但是使我大吃一惊的是，我发现似乎存在从黑洞出来的辐射。我起初以为这一定是我计算中出现了错误。最后说服我这是真实的是这一事实：该辐射恰好是将视界面积等同于黑洞的熵所需要的。这可归结为以下这个简单公式：

$$S = \frac{Ac^3}{4\hbar G}$$

此处S是熵，而A是视界面积。这个表达式包括三个基本的自然常数：c，光速；G，牛顿引力常数和h，普朗克常数。它揭示了在引力和热力学，即热的科学之间存在一个深刻的预想不到的关系。

Whereas Stephen Hawking and Kip Thorne firmly believe that information swallowed by a black hole is forever hidden from the outside universe, and can never be revealed even as the black hole evaporates and completely disappears,

And whereas John Preskill firmly believes that a mechanism for the information to be released by the evaporating black hole must and will be found in the correct theory of quantum gravity,

Therefore Preskill offers, and Hawking/Thorne accept, a wager that:

When an initial pure quantum state undergoes gravitational collapse to form a black hole, the final state at the end of black hole evaporation will always be a pure quantum state.

The loser(s) will reward the winner(s) with an encyclopedia of the winner's choice, from which information can be recovered at will.

Kip S. Thorne　John P. Preskill

Stephen W. Hawking & Kip S. Thorne　　John P. Preskill

Pasadena, California, 6 February 1997

宇宙学幽默，第二部分：和约翰·普列斯基尔打赌

源自黑洞的辐射会携带走能量，黑洞因此而损失质量并缩小。看来，黑洞最终会完全蒸发并消失。这引起了直插物理学核心的一个问题。我的计算暗示，辐射是严格地热性的和随机的，如果黑洞的面积是黑洞的熵，情况就必然如此。那么，留下的辐射怎么会携带关于形成黑洞的东西的全部信息？但如果信息丢失了，这就和量子力学互不相容。

这个悖论已经被争议了三十年，直到我找到了我认为的解决方法之前没有多大进展。信息并没有丢失，不过不以有用的方式返回。这正如焚烧百科全书：如果人们保留所有的烟和灰，包含在百科全书中的信息在技术上并没有损失。但去阅读它却非常困难。事实上，基普·索恩和我以及约翰·普列斯基尔关于信息悖论打了一个赌。当约翰赢了这个赌时，我给了他一套棒球百科全书，但也许我只应给他此书的灰烬。



我们在帕萨迪纳的家

第八章

加州理工

CALTECH

1974年我当选为皇家学会会员。由于当时我很年轻而且只是低级的研究助理，所以这次获选对我系的成员是一件令人惊奇的事。但在三年之内我就晋升为教授。

简在我获选后感到忧愁，觉得我已经大功告成，而此后不免要走下坡路。当我的朋友基普·索恩邀请我们以及其他一些做广义相对论研究的人访问加州理工学院（Caltech）时，她的忧愁才稍微得到解除。





简、露西、罗伯特和我在我们帕萨迪纳的家中

在过去的四年，我使用手动的轮椅，也用蓝色电动三轮车，它以自行车的慢速行驶，我有时用它来非法携带乘客。但我们去加州时，呆在加州理工学院拥有的邻近校园的殖民地风格的房子里，我在那里首次使用电动轮椅。它给了我相当程度的独立，尤其是在美国大楼和人行道比在英国对于残疾人更容易进入的情况下。我还有一位我的研究生和我一起住。他帮助我起床上床以及就餐，其回报是住宿和从我这儿得到大量学术上的关照。

那时期我们两个孩子罗伯特和露西喜爱加州。由于他们就读的学校担心学生被绑架，所以人们不能以正常的方式从学校门口接走孩子，而必须一个接一个地绕过街区再到门口，被接的孩子则用扩音器一个个召唤过来。以前我从未遭遇过类似的事。

房子里装备有一台彩色电视，而我们在英国则只有一台黑白的几乎不工作的电视，所以我们看了许多电视节目，特别是诸如《楼上楼下》和《人类的攀升》等英国系列片。在我听到我被教廷科学院授予庇护十一世奖章时，我们刚好看完《人类的攀升》中的伽利略被梵蒂冈审讯并被判为终身软禁的那一集。起初我想愤怒地拒绝它，但后来我必须承认，梵蒂冈终于改变了它对伽利略的看法。这样我就飞往英国会同我的父母，然后由他们陪我去罗马。在访问梵蒂冈期间，我坚持要看在梵蒂冈图书馆中的审讯伽利略的记载。

在授奖典礼上，教皇保罗六世从他的宝座走下，跪在我的身旁。典礼之后我见了量子论的奠基者之一保罗·狄拉克。因为他在剑桥任教授时

我对量子领域不感兴趣，所以没有和他说过话。他告诉我，他原先建议将奖章授予另一位候选者，但最后认定我更适合并且建议科学院颁奖给我。

那时候加州理工学院物理系的两位主要明星是诺贝尔奖获得者理查德·费恩曼和默里·盖尔曼，而他们之间存在激烈的竞争。在盖尔曼的第一次每周研究班时，他刚说道：“我只不过要重复去年曾经做过的讲演。”费恩曼就马上起身离开。接着盖尔曼讲，“现在他走了，我可以告诉你们我真心要讲的东西。”。

这是粒子物理激动人心的时期。在斯坦福刚发现了新的“粲”粒子，而这一发现有助于证实质子和中子由三种更基本的叫做夸克的粒子组成的盖尔曼理论。

在加州理工学院时，我和索恩打赌说天鹅座X-1双星系统不包括一颗黑洞。天鹅座X-1是一个X射线源，其中的一颗正常恒星正失去它的外层并落到一颗看不见的紧致伴星上去。随着物质朝着伴星落去，它发展出一种螺旋运动并变得非常热，而发射出X射线。我希望打赌输了，因为我显然对黑洞作了巨大的智力投资。但是如果它们被证明不存在，至少我还可以赢得《私家侦探》杂志4年的订阅作为安慰。另一方面，如果基普赢了，他将收到一年的《阁楼》杂志。在之后的年代里，证明黑洞存在的证据变得这么强，我只好承认这个赌失败，并且给基普订了《阁楼》杂志，这使他的妻子极为不悦。

在加利福尼亚，我和加州理工学院的一位研究生唐·佩奇一起做研究。唐是在阿拉斯加的一个乡村出生并长大的，他的父母是学校教员，他们三人是那里仅有的非因纽特人。他是一位福音派基督徒，后来在剑桥和我们在一起时尽力要让我皈依。他通常在早餐时对我念圣经故事，但我告诉他，我从在马略卡的时代起就通晓圣经，因为我父亲经常给我念圣经。（我父亲不是信徒，但认为詹姆士国王钦定版圣经在文化上很重要。）

唐和我研究是否可能观察到我预言过的从黑洞来的辐射。从一颗太阳质量的黑洞来的辐射的温度大约只有百万分之一开，勉强高于绝对温

度，所以它被宇宙微波背景所淹没，后者具有2.7开的温度。然而从大爆炸也许遗留下小得多的黑洞。一座山质量的太初黑洞会发射伽马射线，在发射出它的大部分原始质量后，现在正结束其寿命。我们在伽马射线背景中寻找存在这种辐射的证据，但是没有任何蛛丝马迹。我们能够为这一质量的黑洞的数目密度给出上限，这表明我们不太可能接近一颗这类黑洞，使得能够检测到它。

第九章
婚姻
MARRIAGE

1975年我们从加州理工学院回来后，我们发觉我已不可能攀爬我们家的楼梯。学院到这时对我已相当赏识，就让我们住进学院的一座巨大的维多利亚风格房子里的底层公寓。（这幢房子现在已被拆除并被以我命名的学生宿舍大楼所取代。）这幢公寓处于由学院园丁维护的花园之中，这对于孩子们非常好。

我在回英国时开始情绪低落，和在美国的说干就干的态度比较，在英国所有的东西都这么狭隘和受限制。那个时候，荷兰榆树病肆虐，林木凋尽，整个国家都受此起彼伏的罢工困扰。然而，由于我的研究有了进展，并于1979年当选为卢卡斯数学教授，这是伊萨克·牛顿爵士和保罗·狄拉克一度担任过的职位；我的心情变得舒畅起来。

1979年我旅行到科西加给暑期学校讲课之后，我们第三个孩子蒂莫西出世。之后简的情绪变得更低落了。她担心我很快会死去，希望找到某个人在我死后养活她和孩子并和她结婚。她找到乔纳森·琼斯，一位地方教会的音乐家兼风琴演奏师，并在我们的公寓给了他一个房间。我本应反对这件事，但是我也以为自己会早早死去，并且觉得需要有人在我死后养活孩子们。

我的病情继续恶化，其中的一个症状是长时间的窒息发作。1985年，在去瑞士的欧洲核子研究组织（CERN）的旅行中我得了肺炎。我立即被送到州医院并接上呼吸器。医院的医生认为我的病情严重到他们提出要关掉呼吸机并结束我生命的地步，但是简拒绝了，并把我放在急救飞机上飞回剑桥阿登布鲁克医院。那里的医生想把我恢复到我以前的

情形，但最终他们只好进行气管切开手术。



在我们的第三个孩子蒂莫西受洗后全家合影

我的言语在手术之前就变得更含糊，所以只有熟悉我的人才能听懂我。但那时至少我还能交流。我口授、由秘书来撰写科学论文，而我做研究班讲演时通过一名翻译更清晰地重复我的话。然而，气管切开手术把我的讲话能力全部消除。有一段时期，我仅有的能交流的方法是，有人指着拼写卡，指到正确的字母时我扬一下眉毛，就这样逐个字母地拼出单词来。这样交流是相当困难的，更不用说写篇科学论文了。然而，在加利福尼亚的名叫瓦特·沃尔托兹的电脑专家听说了我的困境，送给我

一套他写的名叫均衡器的电脑程序。这就允许我揿动手中的开关，从屏幕的一系列菜单中选取词汇。现在我用他的另一个叫做词加的程序。在我的眼镜上有一个微小的传感器，对我的面颊运动作出反应，由此控制这个程序。当我把要说的都聚集好，就能将其送到语音合成器去。

起初我只在台式电脑上运行均衡器程序，后来剑桥适应通讯公司的大卫·梅森把一台小型电脑和语音合成器装到我的轮椅上。我现在的电脑是英特尔提供的。这个系统使我比以前交流得更好，而我能每分钟处理3个词。我可以要么说出我已写的，要么将其存在盘里。然后我能将其打印出来，或者把它找出并一句一句地说出来。我已经用这个系统撰写了七部书和一些科学论文。我还做了一些科学和普及的演讲。它们都很受欢迎，我想这在很大程度上归功于语音加创造的语音合成器的高质量。

一个人的话音是非常重要的。如果你话音模糊，人们很可能认为你有精神缺陷。这台语音合成器是我听到的最好的，因为它发出的声音抑扬顿挫，不像《神秘博士》的塔勒克斯的那一台。语音加那时起停止营业，而它的语音合成器项目已经停止。现在我拥有余下的最后三台合成器。它们很笨重，耗电量很大并且有过时的不能被替代的芯片。尽管如此，至今我已认同这声音，它已成为我的商标，所以除非所有三台合成器都毁坏，我不想用更自然发出的声音来替代它。

在我出院时我需要全时护理。起初我觉得我的科学生涯已经完结，而余下能做的一切就是待在家里看电视。但是我很快发现，我还能继续科学研究，并且利用称为Latex的程序写数学方程，该程序允许人们以通常字符来写数学符号，比如用π表示π。

然而，我对简和乔纳森之间日益密切的关系越来越不高兴。我最后不能再忍受这种情形，并且在1990年，我搬出并和我的一位护士伊莱恩·梅森住到一个公寓里去。我们发现对于我们和伊莱恩的两个儿子来说，这公寓太小，这两个孩子一周中有部分时间和我们在一起，于是我们决定搬走。1987年，一次强大的风暴吹掉了纽纳姆学院的房顶。纽纳姆学院是仅有的女生本科学院（这时男生学院也都收女生了。我所在的基斯学院有一些保守的研究员，是其中最迟也招收女生的学院之一，因为终于被学生考试的结果说服，除非也收女生，否则好男生不向它申请。）由于

纽纳姆是一所穷学院，它不得不出售四块地产去修理风暴蹂躏后的房顶。我们购买了其中一块，并且建成了方便轮椅进出的房子。

1995年伊莱恩和我结婚，9个月后简嫁给乔纳森·琼斯。



我娶伊莱恩

我和伊莱恩的婚姻是激情而骚动的。我们也经历了许多波折，但是作为护士，伊莱恩在几个场合救了我的命。气管切开手术后，我在气管上有一个塑料管，这个管子防止食物和唾液进入我的肺部，并由充气的袖袋保持着。多年来在袖袋中的压力损害了我的气管，使我咳嗽并窒息。有一回我在克里特开会，在归途飞行中我咳嗽了。一位名叫大卫·霍德华的外科医生刚好在同一架飞机上，他走近伊莱恩并告诉她，他能帮助我。他建议进行一个喉头切除术，这将把气管和喉咙彻底分开并且不再需要带袖袋的管子。剑桥阿登布鲁克医院的医生说这手术太冒险，但伊莱恩坚持要做，而大卫·霍德华在伦敦的医院为我做了手术。该手术救了我的命：假如不做的话，再过两周这个袖袋就会在我的气管和喉咙之间磨损出一个洞，血就会充满我的肺部。





和伊莱恩在科罗拉多的阿斯彭

几年之后我遭遇到另一次健康危机，因为在深睡时我的氧水平下降到危险的程度。我被紧急送到医院并住院四个月之久。我终于带着呼吸

器出院了，晚上用它。我的医生告诉伊莱恩让我回家等死。（自此我换了医生。）两年前我开始一天24小时用呼吸器。我发现这加强我的精力。

一年之后，我被吸收为一个团队的成员，为大学800周年纪念募捐活动出力。我被派到旧金山，在六天之内作五场报告，这使我精疲力竭。一天上午，当我在脱开呼吸器时昏迷过去。值班护士以为我没事，倘若没有另一位护理传唤伊莱恩，伊莱恩使我苏醒过来的话，我大概早已死去。伊莱恩为这一切危机耗费了大量的情感。我们在2007年离婚。离婚之后我一直单独和一位管家住在一起。

第十章
时间简史
A BRIEF HISTORY OF TIME

我第一次想起写一本关于宇宙的普及著作是在1982年。我的部分目的是为女儿攒一点学费。（事实上，到这本书实际出版的时候，她已经在中学上最后一个学年了。）但是，写这本书的主要动机，是想解释我们已经在何等程度上理解了宇宙：我们一直在寻找能描述宇宙和其中万物的一个完备理论，现在离这个目标是多么接近了。

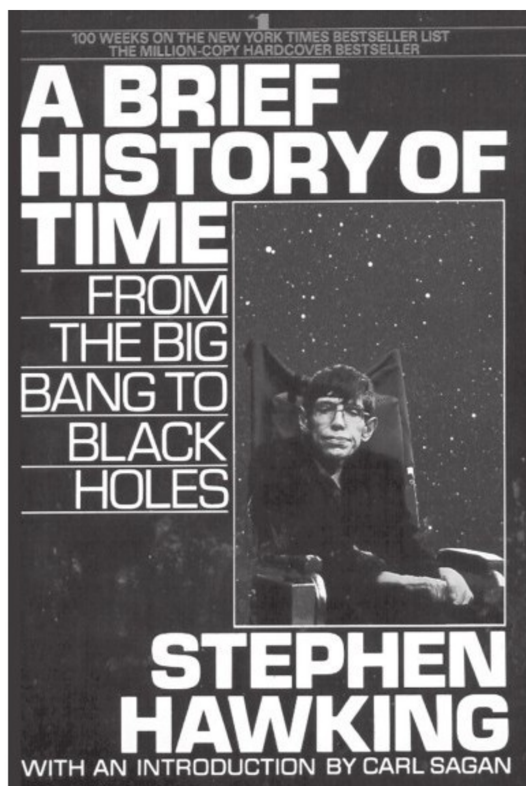
如果我准备花时间和精力去写一本书，我就要让它传播给尽可能多的人。我以前写的专业书一向由剑桥大学出版社出版。那家出版社做得很好，但我觉得它不会真正地面向我想影响到的那一类大众市场。因此，我接触到一位名叫阿尔·朱克曼的文学著作代理人，是我的一位同事的亲戚介绍给我的。我给了他第一章的初稿，并且解释道：我希望它成为在机场书店就能买到的那类书。他告诉我这绝不可能。它也许在学术界和学生中销售良好，但是像这样的一本书，绝不可能进入杰弗里·阿彻的领地。

1984年我给了朱克曼书的第一稿。他把它发给几位出版商并且建议我接受诺顿的报价，诺顿是家很有档次的美国图书公司。可是，我没有采纳这个意见，而决定接受矮脚鸡图书公司的报价。这是一家更面向大众市场的出版商，虽然这个公司并非专门出版科学书籍，然而它的出版物在机场书店很容易得到。

矮脚鸡对这本书的兴趣也许应归因于他们的一位编辑彼德·古查迪。他非常尽责，建议我重写这部书，要写得使像他那样非科学专业的人都能理解。每当我送给他重写的一章，他就发回一个长长的列表，包括一些异议和要我澄清的问题。我时时觉得这个过程将永无终止。但他是对

的：这本书经过修改之后好多了。

《时间简史》的早期封面之一

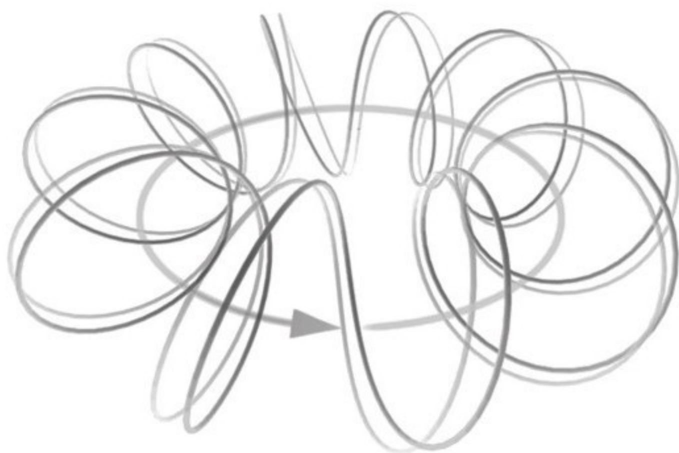


我在CERN时得了场肺炎，只好中断了这部书的撰写。若不是得到一个计算机程序，要完成这部书是根本不可能的。用这个程序有点慢，但那时我思考得慢，所以这很适合我。我利用它几乎完全重写了我的第一稿以回应古查迪的要求。我的一位学生布莱恩·惠特协助我做这一次修改。

雅各布·布罗诺夫斯基的《人类的攀升》电视系列（今天是不允许使用这样的含有性别歧视意味的题目）曾给我留下过深刻的印象。人类从原始野人到我们现在的状况仅需区区一万五千年，这个系列勾画了我们对这整个发展成就的感受。我要传达一种类似感受，就是我们朝着完全理解制约宇宙的定律，已经取得了怎样的进步。我很清楚，几乎每个人都对宇宙如何运行感兴趣，但大多数人无法明白数学方程。我本人对方程也不太在乎。部分原因是我很难把它们写下来，但主要是因为我对方

程没有直觉。相反，我依靠图像来思考，我这本书的目标是靠语言描绘这些心里的图像，还借助于一些熟悉的比喻和图形。我希望，大多数人以这种方式能够分享对过去50年间物理学中取得的惊人进步的激动和感受。

即使我避开使用数学，也仍然很难解释某些观念。这就引起一个问题：我是否应解释它们并冒着把人们弄糊涂的危险？或者是否我应该掩饰这些困难？一些不熟悉的概念，诸如以不同速度运动的观察者测量出同一对事件之间的时间间隔不同，就对我要描绘的图像不太重要。因此，我觉得我可以只提到它们而不必深入探讨。但其他困难的思想，对我要作出解释的东西却很重要。我觉得特别要包括这两种概念：一是所谓的“历史求和”，这是这样一种概念，即宇宙不仅只有一个历史。说得准确些，宇宙有每种可能的历史集合，而所有这些历史都是同等实在的（且不管所谓实在是什么意思）。另外一个使历史求和在数学上有意义而必须解释的概念是“虚时间”。回顾起来，我现在觉得我本应作更大的努力来解释这两项非常难以理解的概念，尤其是虚时间，后者似乎是书中读者最感到麻烦的东西。然而，其实并不真的需要确切理解虚时间是什么——只要知道它与我们称作“实时间”的东西不同即可。



这本书即将发行时，有一位科学家得到了这本书的试印版，那是提供给《自然》杂志写评论的，他发现这部书照片和图片的位置和标号错误百出，而被吓坏了。他给矮脚鸡打电话，他们同样也被吓坏了，并且立刻决定召回并废弃这个印次（开始的第一版书现在也许相当有价值。）矮

脚鸡花了紧张的三整周改正和重校全书，及时地在愚人节的出版日期铺到书店上。正好那个时候，《时代》周刊刊登了我的封面人物介绍。

尽管如此，矮脚鸡还是为本书的销售量所震惊。它在《纽约时报》的畅销书榜列名达147周之久，而在伦敦《泰晤士报》畅销书榜列名达237周之久，已被翻译成40种文字，而且在世界范围内销售了超过一千万册。

我为这本书给出的原始书名是《从大爆炸到黑洞：时间短史》，但古查迪将其颠倒过来，并将“短”改为“简”。这真是神来之笔，而且一定对书的成功贡献甚大。自此之后已有了许多这样那样的“简史”，甚至有《麝香草简史》。效仿是奉承的最真诚形式。

为什么这么多人买这本书？对我而言要做到客观评价肯定很难，于是我想还是看他人怎么说的。我发现大多数评论，尽管都是好意的，却没有多少启发性。它们倾向于遵循一个老套：史蒂芬·霍金患了卢伽雷病（美国评论用语）或者运动神经元症（英国评论用语）；他被禁锢在轮椅上，不能讲话，而只能动X根手指（X似乎从1变到3，依评论者读的哪篇关于我的浮泛文章而定），但他写下了这部所有一切中最大问题的书：我们从何处来，我们往何处去？霍金揭示的答案是宇宙既不创生亦不毁灭；它只是存在。为了阐述这个思想，霍金引进了虚时间概念，我（是指评论员）发现有点跟不上了。尽管如此，如果霍金是对的，而我们真的找到了完备的统一理论，我们也就真正理解了上帝的精神。（我在读校样时几乎删去书中的这个最后一句，也就是我们就会理解上帝的精神。如果我这么做了，那销售量也许会减半。）

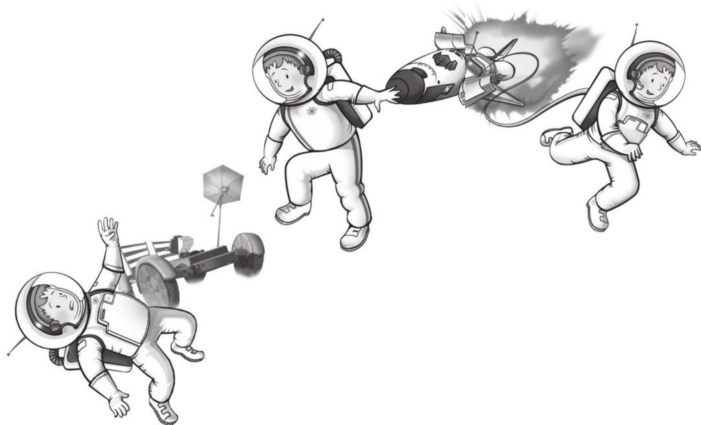
我觉得，发表在伦敦的报纸《独立报》上的一篇文章更为敏锐。该文说即使像《时间简史》这样严肃的科学著作也会成为迷信的书。把我的书和《禅和摩托维修技术》相提并论使我感觉受到相当大的恭维。我希望，正如禅宗，它让人们觉得，他们不必和伟大智慧与哲学问题无缘。

无疑地，我身罹残疾，然而努力使自己成为理论物理学家，这种让人们感兴趣的故事也对这本书的销售推波助澜。因书中只有两处提到我的状况，所以凭这种兴趣来购买此书的人士一定十分失望。这部书是试图写宇宙的历史，而非我的历史。但这并没有阻止人们谴责矮脚鸡利用我的疾病以及我与之合作、允许我的照片印在封面上的可耻行为。事实

上，按照合同，我对封面无控制权。然而，我的确设法说服英国的出版者使用比那张糟糕的、过时的、曾经用在美国的封面上的较好的照片印在英国版上。然而，因为有人讲美国公众已经把那张照片和书相认同，矮脚鸡不愿改变美国版封面上的照片。

人们还提出，许多人买这部书是为了在书架上或者咖啡桌上展示，实际上并不阅读。我肯定这种事会发生，尽管我不知这情形是否会比大多数其他严肃的书籍更甚。我的确知道至少一些人研读完，因为每天我都会收到关于此书的一叠信件，许多人提出问题并且做出许多仔细的评论，这表明他们读了它，尽管他们不能理解它的全部。我还在街上被陌生人拦住，他们告诉我多么欣赏这本书。我接收到这类公众祝贺的频率（或许我不比多数作者更杰出，但确比他们更与众不同）似乎表示，至少有部分买了这本书的人真的读了它。

自《时间简史》之后，我又写了其他几本书，向较广大的公众解释科学：《黑洞和婴儿宇宙》，《果壳中的宇宙》和《大设计》。我觉得，人们对科学的基本理解是很重要的，这样他们在不断发展的科技世界中就能做出有根据的决定。我的女儿露西和我还写了《乔治的宇宙》系列书籍，这是为儿童，也就是明天的成人写的以科学为基础的奇遇。



第十一章
时间旅行
TIME TRAVEL

1990年基普·索恩提出，通过虫洞也许可能旅行到过去。因此，我认为值得去研究：物理定律是否允许时间旅行。

由于几个原因，公开思考时间旅行是微妙的。如果报界得知政府资助时间旅行的研究，那就会引起抗议，责备政府浪费公币，或者要求研究归类于军事用途。毕竟，如果其他国家已拥有时间旅行而我们却没有，那我们如何保护自己？在物理学圈子里，只有我们中间一些人足够蛮干，从事有人认为不严肃的“政治不正确课题”的研究。于是我们利用技术行话来隐藏我们的焦点，诸如用“闭合的粒子路径”暗指时间旅行。

1689年，伊萨克·牛顿爵士首次对时间作出科学的描述。他在剑桥坐过我也曾坐在其上的卢卡斯教席座椅（尽管在他那时候不是用电力操纵的）。在牛顿的理论中，时间是绝对的，而且无情地前进。不可能折返并回到更早的年代。然而，当爱因斯坦阐述了广义相对论，在该理论中时空被宇宙中的物质和能量弯曲并畸变，这种情形就改变了。时间仍然局部地增加，但现在已存在可能性：时空被弯曲得这么厉害，人们可以沿着一条路径前进，该路径会将他带回到他出发之前。

允许这种情形发生的一种可能性是虫洞，这是可以把空间和时间中不同区域相连接的假设的时空管子。意思是你迈进虫洞的一个开口，而从处于不同空间和时间的其他开口迈出。虫洞，如果它们存在的话，对于快速空间旅行来说是理想的。你可以通过一个虫洞到达这星系的另一面，然后及时赶回来吃晚餐。然而，人们可以证明，如果虫洞存在，你

还能使用它们回到你出发之前。那么人们会想到，你能做诸如首先把你自己的太空飞船在它原先的发射台上摧毁，以防止你自己出发之类的事吗？这就是所谓“祖父悖论”的变种：如果你回到过去，在你父亲被孕育之前就把你祖父杀死，将会发生什么？那么你在目前的状态下存在吗？如果答案是否定的话，那就表示你不存在，也不可能回到过去杀死你祖父。当然，如果你相信，当你在时间中回到过去时，拥有自由的意志去为所欲为并且改变历史——只有那样，这才是悖论。

真正的问题是，物理定律是否允许虫洞和时空弯曲到这种程度，使得诸如太空飞船这样的宏观物体能够回到它自己的过去。根据爱因斯坦的理论，一艘太空飞船必须以低于光的局部速度旅行，并且遵循所谓的“类时路径”通过时空。这样，人们能够用专业术语将这问题表述为：时空允许闭合的类时曲线，也就是一次次回到它的出发点的类时曲线吗？

我们可以试着在三种水平上回答这个问题。第一种水平是爱因斯坦的广义相对论。这是被称为经典理论的东西，也就是说，它假定宇宙具有一个定义明确的历史，没有任何不确定性。对于经典广义相对论，我们对于时间旅行可能会如何运作有个相当完整的图像。然而，我们知道，经典理论不可能完全正确，因为我们观察到，宇宙中的物质受涨落支配，而它的行为不能被准确地预言。

1920年代所谓量子论的范式得到发展，它被用来描述这些涨落并量化该不确定性。因此，人们可在这称为半经典理论的第二种水平上询问有关时间旅行的问题。人们在这种水平上考虑经典时空背景下的量子物质场。这里的图像较不完整，但至少我们拥有了某些如何前进的见解。

最后，我们还有完全的量子引力论，无论它可能是什么样的。这里甚至连如何提出“时间旅行可能吗？”的问题都不清楚。也许人们能做的最好的事情，是询问在无穷远处观察者会如何解释他们的测量。他们会认为时间旅行已在时空内部发生了吗？

且返回经典理论：平坦时空不包含闭合的类时曲线，早先知道的爱因斯坦方程的其他解也不包含。所以，当1949年库尔特·哥德尔发现了表述充满旋转物质的宇宙的一个解，而且该解在时空每一点都有闭合类时曲线通过时，这对爱因斯坦是一个巨大的震动。哥德尔解需要一个宇宙常

数，现已知道那个常数是存在的，虽然后来找到的其他解没有宇宙常数。

两根高速运动并相互穿过的宇宙弦是说明这点的特别有趣的情形。正如它们的名字所暗示的，宇宙弦是具有长度但截面微小的物体。一些基本粒子理论预言它们会发生。一根单独的宇宙弦的引力场是平坦空间被切掉一个楔形，而弦位于其锐端。于是，如果有人围绕宇宙弦走一圈，其空间的距离比所预料的较短，但时间不受影响。这意味着围绕着单独宇宙弦的时空不包含任何闭合的类时曲线。

然而，如果存在第二根相对于第一根运动的宇宙弦，被它切出的楔形会既缩短空间距离又缩短时间间隔。如果这两根宇宙弦以接近光速的速度做相对运动，围绕着两个弦行进的时间可节省到足以使人回到他出发之前。换言之，存在闭合的类时曲线，人们可以沿着它旅行到过去。

宇宙弦时空包含具有正能量密度的物质，因此在物理上它是合理的。然而，产生闭合类时曲线的翘曲一直延续到无限远的地方而又回到无限远的过去。于是，这类时空是携带着时空旅行而创生的。我们没有理由相信，我们自己的宇宙以这种翘曲的方式创生，而且我们没有来自未来的访问者的可靠证据。（当然，我们在此不理会那种幽浮（UFO）阴谋说，按照那个说法，幽浮来自将来；政府知道那是阴谋并加以掩盖。但政府掩盖的纪录并不那么好。）因此，人们应假定在某一常数时间的面S之前不存在闭合的类时曲线。

那么，问题是某种先进文明能否建造时间机器。也就是说，能否修正S将来的时空，使在一个有限的区域出现闭合的类时曲线？我说“一个有限的区域”，是因为无论文明变得多先进，都可以设想它只能控制宇宙的有限部分。

在科学中，寻找问题的正确表述经常是解决它的关键，而这就是一个好例子。为了定义一台有限时间机器是指什么，我要回到我早年的某些研究。我将S的未来柯西发展定义为时空的点集，这些点处的事件完全由发生在S上的东西所确定。换言之，它是这样的时空区域，上面的每一可能的以低于光速运动的路径都来源于S。然而，如果先进的文明要建造一台时间机器，在S的未来就会存在一根闭合的类时曲线C。C将会在S的未来不断地循环，但它不会回来与S相交。这意味着C不会在S的柯西发展中。这样S会有一个柯西视界，这视界是S的柯西发展的未来边

界。

在一些黑洞的内部或者在反德·西特空间中会出现柯西视界。然而，在这些情形中，形成柯西视界的光线从无限远或者奇点开始，为了创生这样的柯西视界，要么必须将时空一直翘曲到无限远，要么必须在时空中出现奇点。一直延伸到无限远的翘曲时空在理论上甚至超出最先进文明的能力范围，它的能力只能在有限区域翘曲时空。先进文明能够聚集足够物质去导致引力坍缩，至少根据经典广义相对论，由此会产生时空奇点。但是爱因斯坦方程在奇点处无法定义，所以人们无法预言在柯西视界以外将会发生什么，尤其不知道是否会有任何闭合的类时曲线。

因此，人们应将我称为有限生成的柯西视界作为时间机器存在与否的判据。这是都由一紧致区域出发的光线生成的柯西视界。换言之，它们不从无限远或一个奇点到来，而是由包含闭合类时曲线的一个有限区域起始，我们设想过我们的先进文明会创生这一类区域。

采用这个定义当作时间机器的机制有一点便利之处，即人们可以利用彭罗斯和我为研究奇点和黑洞而发展出的因果结构方法。甚至不用爱因斯坦方程，我也能够证明，一般地讲，有限生成的柯西视界会包含一根闭合光线，或一根不断重复回到同一点的光线。此外，光线每一次回转，都会越来越蓝移，于是影像会变得越来越蓝。光线每转一圈都会被足够散焦，使得光能量不会聚集成无限大。然而，蓝移意味着一颗光粒子只有有限的历史，该历史是由它自己的时间测度定义的，尽管它在有限的区域中不断绕行，并且不撞到一个曲率奇点上去。



和罗杰·彭罗斯（后排中）以及基普·索恩（前排最左），还有其他人



和罗杰·彭罗斯以及他的妻子凡妮莎

人们也许不在乎一颗光粒子在有限时间里是否完结它的历史。但我还能够证明会存在以低于光速运动的具有有限持续时间的路径。这些可以是在柯西视界之前被陷在有限区域中的观察者的历史，他们越来越快地循环运动并在有限时间内达到光速。

所以，如果飞碟上的一位美艳的外星人邀你进入她的时间机器，小心慎入。你可能落入这些不可逃逸的只有有限持续时间的重复历史之一中。

正如我说过的，这些结果不依赖于爱因斯坦方程，只依赖于时空在有限的区域内必须翘曲以产生闭合类时曲线的方式。然而现在人们可以质问：一种先进文明为了翘曲时空以建造一台有限大小的时间机器需要哪种物质？它能到处都具有正的能量密度，正如在宇宙弦时空中一样吗？人们或许想象，可用宇宙弦的有限的圈建造一个有限的时间机器，并使处处的能量密度为正。我很遗憾让那些想返回过去的人们失望，利用处处正能量密度这一点就做不到。我证明了为了建造一台有限时间机器，你需要负能量。

在经典理论中，所有物理上合理的场都服从弱能量条件，即对于任何观察者而言，能量密度总是大于或等于零。这样，在纯粹经典理论中有限尺度的时间机器被排除在外。然而，在考虑经典时空背景中的量子

场的半经典理论中，情形又有所不同。量子论的不确定性原理意味着，场总是上下起伏，甚至在显然空虚的空间中也这样。这些量子起伏使能量密度无限大。于是人们必须减去一个无限大的量以得到观察到的有限能量密度。否则，能量密度会将时空弯曲成一个单独的点。这种减除会使得能量期望值至少在局部上为负。甚至在平坦空间里，人们也可找到其能量密度局部为负，尽管积分的总能量为正的量子态。

人们也许纳闷，这些负的期望值是否真的能使时空以恰当的方式翘曲。但它似乎应该如此。量子论的不确定性原理允许粒子和辐射从黑洞泄漏出来。这使黑洞损失质量，而缓慢地蒸发。由于黑洞视界缩小尺度，在视界的能量密度必然为负，并且弯曲时空以使光线相互散开。如果能量密度总是正的而且弯曲时空，以使光线弯折相互收拢，黑洞视界面积就只能随时间增大。

黑洞蒸发展示，物质的量子能量动量张量有时能在为创造时空机器需要的方向上弯曲时空。因此，人们也许会想象某种非常先进的文明能够做出安排，使能量密度的期望值负到足以形成能被宏观物体使用的时间机器。

但是黑洞的视界跟时间机器中的视界有一个重要的差别。后者包含有不断绕圈走的闭合光线。这会使能量密度无限大，这意味着试图穿过视界进入时间机器的人或者太空船会被辐射的霹雳夺去性命。这也许是来自自然的警告：不要干预过去。

这样，时间旅行的未来似乎是黑暗的：或许我应该说令人炫目的白亮？然而，能量动量张量的期望值依赖于在背景中的场的量子态。人们也许猜测，可能存在其能量密度在视界上有限的量子态，并且存在这种情形的例子。你如何获得这样的量子态，或者它是否对物体穿越视界时稳定，我们不知道。但它可能在一个先进文明的能力之内。

这是一个物理学家可自由讨论而不被嘲笑轻蔑的问题。即使最后结果是时间旅行不可能，我们理解为何它是不可能的也很重要。

我们对完全的量子引力论所知不多。然而，人们可以预料，它只在十亿亿亿亿分之一厘米普朗克长度下与半经典理论不同。时空背景的量子涨落可在微观尺度上顺利创生虫洞和时间机器，但是根据广义相对论，宏观物体不能回到它的过去。

即使在将来发现了某种不同理论，我认为时间旅行将永不可能。如果那是可能的，时到如今，我们早就该备受来自未来的旅客的蹂躏了。

第十二章 虚时间 IMAGINARY TIME

在加州理工学院时，我去了圣巴巴拉，从学院出发沿海岸往北驾车两小时。我和那里的朋友兼合作者詹姆斯·哈特尔一起研究粒子如何从黑洞发射出来的新方法，该方法将粒子能够采取的从黑洞逃出的所有路径叠加起来。我们发现粒子从黑洞发射出来的概率和粒子落入黑洞的概率相关的方式，与热体的发射概率和吸收概率相关的方式相同。这再次展示，黑洞就像拥有温度以及与它们视界面积成比例的熵那样行为。

我们的计算用了虚时间的概念，它可被认为是时间在和通常实时间成直角的一个方向。回到剑桥后，我和两位我过去的学生盖瑞·吉朋斯和马尔科姆·佩里进一步发展这一思想。我们用虚时间来取代实时间。这被称为欧氏方法，因为它使时间变成空间的第四个方向。起初我的研究大受反对，但现在这已被普遍接受为研究量子引力的最好方法。黑洞的欧氏空间是光滑的，而且不包含物理方程会在那里崩溃的奇点。它解决了彭罗斯和我自己的奇点定律提起的基本问题：由于奇点预见性会崩溃。利用欧氏方法我们就能够理解为何黑洞会像热体那样行为并具有熵的深层原因。盖瑞和我还证明了，一个以不断增长速率膨胀的宇宙的行为，就仿佛它拥有黑洞具有的有效温度。那时我们以为永远观察不到这个温度，但它的意义在14年后变得明显了。

我主要从事黑洞研究，但我对宇宙学的兴趣由于早期宇宙经历过一个暴胀时期的种种迹象而被重新唤起。宇宙尺度会以愈来愈快的速率增长，正如商店中的价格增长一样。1982年，我利用欧氏方法证明，这样的一个宇宙会变得稍微不均匀。几乎与此同时，俄国的科学家维亚切斯拉夫·

穆哈诺夫得到类似的结果，但那在后来才被西方知道。

这些非均匀性可被认为由盖瑞·吉朋斯和我在8年前发现的在暴胀宇宙中有效温度引起的热起伏所致。后来其他几位科学家也作出类似的预言。我在剑桥举办了一次研讨会，这个领域的所有重要人员都参加了，而且我们在这次会议上建立了我们现在暴胀图像的大部分，包括引起星系形成并由此我们存在的至关重要的密度起伏。

这比宇宙背景探索者（COBE）卫星记录出由密度起伏产生的微波背景在不同方向上的差别早十年。在引力研究中，理论就这样再次超前于实验。后来威尔金森微波各向异性探测器（WMAP）和普朗克卫星证实了这些起伏，并且发现与预言精确一致。

原先的暴胀场景是从宇宙的一个大爆炸奇点起始的。随着宇宙膨胀，假定它不知怎么回事进入暴胀状态。我觉得这并不是一个满意的解释，因为正如前面讨论的，所有方程在大爆炸的时刻都会崩溃。但是，除非人们知道从初始奇点出现什么，他就不能计算宇宙会怎么发展。宇宙学就不具有任何预言能力。所需要的正是没有奇点的时空，正如在黑洞的欧氏版本一样。

剑桥的研讨会后，我在圣巴巴拉刚建立的理论物理研究所度过夏天。我对詹姆斯·哈特尔讲如何应用欧氏方法到宇宙学中去。根据欧氏方法，宇宙的量子行为由对在虚时间中某个种类的历史的费恩曼求和给出。因为虚时间正如空间的另一个方向那样行为，在虚时间中的历史可以是闭合的曲面，正如地球的表面，既没有开端，也没有终结。

詹姆斯和我判定这是最自然的历史集合选择，确实是仅有的自然选择。我们阐述了无边界设想：宇宙的边界条件是，它是闭合的、没有边界的。根据无边界设想，宇宙的开端正如地球的南极，纬度起着虚时间的作用。宇宙作为一个点起始于南极。随着往北运动，代表宇宙尺度的常数纬度的圈会膨胀。询问诸如在宇宙起始之前发生什么因此就变成无意义的问题，因为在南极之南没有任何东西。

时间，正如用纬度测量的，在南极会有一个起始，但是南极和地球上的任何其他点非常像。同样的自然定律，在南极也和在其他地方一样

成立。这就排除了对宇宙有一个起始——它会是正常定律崩溃的地方——的古老的异议。这样，倒成了宇宙的开端由科学定律所制约。我们把时间变成空间中的一个方向，这就回避了“时间具有开端”这样一个科学和哲学的困难。



和唐·佩奇（后排最左），基普·索恩（前排右三）和詹姆斯·哈特尔（前排最右），还有其他人

无边界条件意味着宇宙会从无中自发地创生。起初，无边界设想似乎没有预言到足够的暴胀，但我后来意识到，宇宙给定的位形的概率必须由位形的体积加权。最近，詹姆斯·哈特尔，托玛斯·赫托格（另一位过去的学生）和我发现，在暴胀中的宇宙和具有负曲率的空间之间存在对耦性。这就允许我们以一种新方法来阐述无边界设想，并利用为这种空间而发展出来的相当专业的工具。无边界设想预言，宇宙会从几乎完全光滑、但具有微小的偏离起始。随着宇宙的膨胀，这些偏离会增长，并导致星系、恒星和宇宙中包括生物之内的所有其他结构的形成。无边界条件是创生的关键，是我们在此的原因。

第十三章 无边界

NO BOUNDARIES

当我21岁患上ALS病时，我觉得这太不公平了。这为何会发生在我身上？那时，我认为我的生命完了，而且我将永远不能实现我自认为拥有的潜力。但是现在，50年之后，我能安然对自己的一生表示满意。我结了两次婚，并有三个漂亮并卓有建树的孩子。我的科学生涯很成功：我认为大多数理论物理学家都同意，我的黑洞量子发射预言是正确的，虽然它迄今还未为我赢得诺贝尔奖，这是因为在实验上证实它非常困难。不过，我赢得了更有价值的基本物理学奖，这是奖给尽管还未被实验证实，却具有理论意义的发现的奖项。

我的残疾并未对我的科学研究形成严重的障碍。事实上，我猜想在某些方面这反而是财富：我不必去讲课或者去教本科生，而且我也不必参与冗长的耗时的委员会。这样，我能够全身心地投入研究。

对于我的同事而言，我只不过是另一位物理学家，但对于广大的公众，我也许是世界上最著名的科学家。这部分是因为科学家们，除了爱因斯坦，并非广为知名的摇滚明星，而且部分是因为我切合残疾人天才的定型。我不能用假发和墨镜来伪装自己——轮椅暴露了我的身份。

成名和易于辨认既有好处也有坏处。坏处是做平常事非常困难，诸如在购物时被要合影的人们围困，而且，过去媒体对我的私人生活有一种不良的兴趣，但是好处远远地超过了坏处。人们似乎真正地喜欢看到我。2012年，我在伦敦残奥会上充当主持人，拥有过数量空前的听众。

我的一生是充实而满足的。我相信残疾人应专注于障碍不能阻止他们做的事，而不必对他们不能做的事徒然懊丧。在我的情形下，我尽力

做我要做的大多数事情。我游遍天下。我访问苏联7次。我第一次和一组学生同去，其中一人是浸礼会教友，他想散发俄文圣经，并求我们将圣经偷运进去。我们设法做到不被发现，但在我们返程出关之时，当局已经发现我们之所为，并把我们拘留了一阵。然而，因偷运圣经而对我们罚款会引起国际纠纷和不利的宣传，所以几个小时后就给放行了。另外6次是会见苏联的科学家们，那时候不准他们到西方旅行。1990年苏联解体后，许多最好的科学家到了西方，所以自那以后我再也没去过俄国。



2012年主持残奥会



游览北京天坛

和我的女儿露西会见女王伊丽莎白二世



我还访问了日本6次，中国3次，还去了除澳洲外的每一个大陆，包括南极洲。我会见了韩国、中国、印度、爱尔兰、智利和美国的国家元

首。我在北京的人民大会堂和白宫作过讲演。我曾经乘潜水艇下到海里，也曾乘气球和零重力飞行器上到天上，而且我还向“维珍银河”预订了太空飞行。



体验零重力

我早年的研究证明了经典广义相对论在大爆炸和黑洞奇点处崩溃。我后来的研究证明了量子论如何能预言在时间的开端和终结处发生什么。活着并从事理论物理研究，使我拥有一个美妙的生涯。如果说我曾经为理解宇宙添砖加瓦的话，我会因此而感到快乐。

第一推动丛书：宇宙系列

The Cosmos Series

时间简史

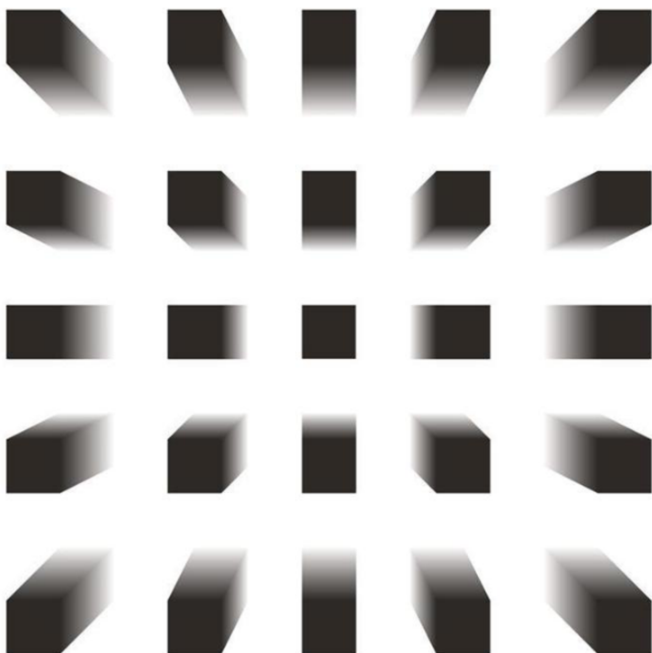
A Brief History of Time

[英] 史蒂芬·霍金 著

许明贤 吴忠超 译

Stephen Hawking

THE FIRST MOVER



CTS 湖南科学技术出版社

版权信息

时间简史

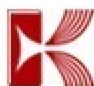
著者：[英]史蒂芬·霍金

译者：许明贤　吴忠超

责任编辑：李永平　孙桂均

装帧设计：邵年　李叶　李星霖　赵宛青

ISBN：9787535794567


湖南科学技术出版社
HUNAN SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS

目录

版权信息
总序
再版序 一个坠落苹果的两面：极端智慧与极致想象
译者序
前言
第1章 我们的宇宙图象
第2章 空间和时间
第3章 膨胀的宇宙
第4章 不确定性原理
第5章 基本粒子和自然的力
第6章 黑洞
第7章 黑洞不是这么黑的
第8章 宇宙的起源和命运
第9章 时间箭头
第10章 虫洞和时间旅行
第11章 物理学的统一
第12章 结论
阿尔伯特·爱因斯坦
伽利略·伽利雷
艾萨克·牛顿
小辞典
感谢

总序

《第一推动丛书》编委会

科学，特别是自然科学，最重要的目标之一，就是追寻科学本身的原动力，或曰追寻其第一推动。同时，科学的这种追求精神本身，又成为社会发展和人类进步的一种最基本的推动。

科学总是寻求发现和了解客观世界的新现象，研究和掌握新规律，总是在不懈地追求真理。科学是认真的、严谨的、实事求是的，同时，科学又是创造的。科学的最基本态度之一就是疑问，科学的最基本精神之一就是批判。

的确，科学活动，特别是自然科学活动，比起其他的人类活动来，其最基本特征就是不断进步。哪怕在其他方面倒退的时候，科学却总是进步着，即使是缓慢而艰难的进步。这表明，自然科学活动中包含着人类的最进步因素。

正是在这个意义上，科学堪称为人类进步的“第一推动”。

科学教育，特别是自然科学的教育，是提高人们素质的重要因素，是现代教育的一个核心。科学教育不仅使人获得生活和工作所需的知识和技能，更重要的是使人获得科学思想、科学精神、科学态度以及科学方法的熏陶和培养，使人获得非生物本能的智慧，获得非与生俱来的灵魂。可以这样说，没有科学的“教育”，只是培养信仰，而不是教育。没有受过科学教育的人，只能称为受过训练，而非受过教育。

正是在这个意义上，科学堪称为使人进化为现代人的“第一推动”。

近百年来，无数仁人志士意识到，强国富民再造中国离不开科学技术，他们为摆脱愚昧与无知做了艰苦卓绝的奋斗。中国的科学先贤们代代相传，不遗余力地为中国的进步献身于科学启蒙运动，以图完成国人的强国梦。然而可以说，这个目标远未达到。今日的中国需要新的科学启蒙，需要现代科学教育。只有全社会的人具备较高的科学素质，以科

学的精神和思想、科学的态度和方法作为探讨和解决各类问题的共同基础和出发点，社会才能更好地向前发展和进步。因此，中国的进步离不开科学，是毋庸置疑的。

正是在这个意义上，似乎可以说，科学已被公认是中国进步所必不可少的推动。

然而，这并不意味着，科学的精神也同样地被公认和接受。虽然，科学已渗透到社会的各个领域和层面，科学的价值和地位也更高了，但是，毋庸讳言，在一定的范围内或某些特定时候，人们只是承认“科学是有用的”，只停留在对科学所带来的结果的接受和承认，而不是对科学的原动力——科学的精神的接受和承认。此种现象的存在也是不能忽视的。

科学的精神之一，是它自身就是自身的“第一推动”。也就是说，科学活动在原则上不隶属于服务于神学，不隶属于服务于儒学，科学活动在原则上也不隶属于服务于任何哲学。科学是超越宗教差别的，超越民族差别的，超越党派差别的，超越文化和地域差别的，科学是普适的、独立的，它自身就是自身的主宰。

湖南科学技术出版社精选了一批关于科学思想和科学精神的世界名著，请有关学者译成中文出版，其目的就是为了传播科学精神和科学思想，特别是自然科学的精神和思想，从而起到倡导科学精神，推动科技发展，对全民进行新的科学启蒙和科学教育的作用，为中国的进步做一点推动。丛书定名为“第一推动”，当然并非说其中每一册都是第一推动，但是可以肯定，蕴含在每一册中的科学的内容、观点、思想和精神，都会使你或多或少地更接近第一推动，或多或少地发现自身如何成为自身的主宰。

再版序　一个坠落苹果的两面：极端智慧与极致想象

龚曙光

2017年9月8日凌晨于抱朴庐

连我们自己也很惊讶，《第一推动丛书》已经出了25年。

或许，因为全神贯注于每一本书的编辑和出版细节，反倒忽视了这套丛书的出版历程，忽视了自己头上的黑发渐染霜雪，忽视了团队编辑的老退新替，忽视好些早年的读者已经成长为多个领域的栋梁。

对于一套丛书的出版而言，25年的确是一段不短的历程；对于科学研究的进程而言，四分之一个世纪更是一部跨越式的历史。古人“洞中方七日，世上已千秋”的时间感，用来形容人类科学探求的速律，倒也恰当和准确。回头看看我们逐年出版的这些科普著作，许多当年的假设已经被证实，也有一些结论被证伪；许多当年的理论已经被孵化，也有一些发明被淘汰……

无论这些著作阐释的学科和学说属于以上所说的哪种状况，都本质地呈现了科学探索的旨趣与真相：科学永远是一个求真的过程，所谓的真理，都只是这一过程中的阶段性成果。论证被想象讪笑，结论被假设挑衅，人类以其最优越的物种秉赋——智慧，让锐利无比的理性之刃，和绚烂无比的想象之花相克相生，相否相成。在形形色色的生活中，似乎没有哪一个领域如同科学探索一样，既是一次次伟大的理性历险，又是一次次极致的感性审美。科学家们穷其毕生所奉献的，不仅仅是我们无法发现的科学结论，还是我们无法展开的绚丽想象。在我们难以感知的极小与极大世界中，没有他们记历这些伟大历险和极致审美的科普著作，我们不但永远无法洞悉我们赖以生存世界的各种奥秘，无法领略我们难以抵达世界的各种美丽，更无法认知人类在找到真理和遭遇美景时的心路历程。在这个意义上，科普是人类极端智慧和极致审美的结晶，是物种独有的精神文本，是人类任何其他创造——神学、哲学、文学和

艺术无法替代的文明载体。

在神学家给出“我是谁”的结论后，整个人类，不仅仅是科学家，包括庸常生活中的我们，都企图突破宗教教义的铁窗，自由探求世界的本质。于是，时间、物质和本源，成为了人类共同的终极探寻之地，成为了人类突破慵懒、挣脱琐碎、拒绝因袭的历险之旅。这一旅程中，引领着我们艰难而快乐前行的，是那一代又一代最伟大的科学家。他们是极端的智者和极致的幻想家，是真理的先知和审美的天使。

我曾有幸采访《时间简史》的作者史蒂芬·霍金，他痛苦地斜躺在轮椅上，用特制的语音器和我交谈。聆听着由他按击出的极其单调的金属般的音符，我确信，那个只留下萎缩的躯干和游丝一般生命气息的智者就是先知，就是上帝遣派给人类的孤独使者。倘若不是亲眼所见，你根本无法相信，那些深奥到极致而又浅白到极致，简练到极致而又美丽到极致的天书，竟是他蜷缩在轮椅上，用唯一能够动弹的手指，一个语音一个语音按击出来的。如果不是为了引导人类，你想象不出他人生此行还能有其他的目的。

无怪《时间简史》如此畅销！自出版始，每年都在中文图书的畅销榜上。其实何止《时间简史》，霍金的其他著作，《第一推动丛书》所遴选的其他作者著作，25年来都在热销。据此我们相信，这些著作不仅属于某一代人，甚至不仅属于20世纪。只要人类仍在为时间、物质乃至本源的命题所困扰，只要人类仍在为求真与审美的本能所驱动，丛书中的著作，便是永不过时的启蒙读本，永不熄灭的引领之光。虽然著作中的某些假说会被否定，某些理论会被超越，但科学家们探求真理的精神，思考宇宙的智慧，感悟时空的审美，必将与日月同辉，成为人类进化中永不腐朽的历史界碑。

因而在25年这一时间节点上，我们合集再版这套丛书，便不只是为了纪念出版行为本身，更多的则是为了彰显这些著作的不朽，为了向新的时代和新的读者告白：21世纪不仅需要科学的功利，而且需要科学的审美。

当然，我们深知，并非所有的发现都为人类带来福祉，并非所有的创造都为世界带来安宁。在科学仍在为政治集团和经济集团所利用，甚至垄断的时代，初衷与结果悖反、无辜与有罪并存的科学公案屡见不鲜。对于科学可能带来的负能量，只能由了解科技的公民用群体的意愿

抑制和抵消：选择推进人类进化的科学方向，选择造福人类生存的科学发现，是每个现代公民对自己，也是对物种应当肩负的一份责任、应该表达的一种诉求！在这一理解上，我们将科普阅读不仅视为一种个人爱好，而且视为一种公共使命！

牛顿站在苹果树下，在苹果坠落的那一刹那，他的顿悟一定不只包含了对于地心引力的推断，而且包含了对于苹果与地球、地球与行星、行星与未知宇宙奇妙关系的想象。我相信，那不仅仅是一次枯燥之极的理性推演，而且是一次瑰丽之极的感性审美……

如果说，求真与审美，是这套丛书难以评估的价值，那么，极端的智慧与极致的想象，则是这套丛书无法穷尽的魅力！

译者序

许明贤　吴忠超

宇宙学是一门既古老又年轻的学科。作为宇宙中高等生物的人类不满足于自身的生存和种族的绵延，还一代代地探索着存在和生命的意义。但是，人类理念的进化是极其缓慢和艰苦的。从亚里士多德—托勒密地心说到哥白尼—伽利略日心说的演化就花了大约2000年的时间。令人吃惊的是，尽管人们知道世间的一切都在运动，但只有到了20世纪20年代哈勃发现了红移定律后，宇宙演化的观念才进入人类的意识。在此之前，人们甚至从未想到过宇宙还会演化。无论是牛顿的万有引力理论还是爱因斯坦的广义相对论都不能得到稳态的宇宙模型。为了得到一个这样的模型，爱因斯坦甚至不惜牺牲理论的美丽，将宇宙常数引进他的方程。可见宇宙演化的观念并非产生于这些天才的头脑之中。

哈勃的发现标志着现代宇宙学的诞生。他的红移定律说，从星系光谱的红移可以推断，越远的星系以越快的速度飞离我们，这表明整个宇宙处于膨胀的状态。从时间上倒溯到过去，估计在100亿至200亿年之前发生过一次开天辟地的大爆炸，宇宙就从这个极其致密极热的状态中诞生。伽莫夫在1948年发表的关于热大爆炸模型的文章中作出了一个惊人的预言，早期大爆炸的辐射仍残存在我们的周围，不过由于宇宙膨胀引起的红移，其绝对温度只余下几度了。在这种温度下，辐射处于微波的波段。然而，在1965年彭齐亚斯和威尔逊观测到宇宙微波背景辐射之前，人们并不认真对待这个预言。

一般认为，爱因斯坦的广义相对论是描述宇宙的正确理论。在经典广义相对论的框架中，霍金和彭罗斯，在很一般的条件下，证明了时空一定存在奇点，最著名的奇点即是黑洞里的奇点和宇宙大爆炸处的奇点。所有定律和可预见性都在奇点处失效。奇点可以看作时空的边缘或边界。只有给定了奇点处的边界条件，才能从爱因斯坦方程得出宇宙的演化。由于边界条件只能由宇宙外的造物主给定，所以宇宙的命运就操纵在造物主手中。这就是从牛顿时代起一直困扰人类智慧的第一推动问题。

如果时空没有边界，则就不必劳驾上帝进行第一推动了。这只有在量子引力论中才能做到。霍金认为宇宙的量子态是处于一个基态，而时空可被看成是一个有限无界的四维面，正如地球的表面一样，只不过多了两个维数而已。宇宙中的所有结构都起源于量子力学的不确定性原理允许的最小起伏。从一些简单的模型计算可得出和天文观测相一致的推论，如星系团、星系、恒星等成团结构，宇宙大尺度的均匀性和各向同性，时空的平性，时空的维数，太初引力波和太初黑洞，以及时间的箭头等。霍金的量子宇宙学在于它真正使宇宙论成为一门成熟的科学。它是一个自足的理论，即在原则上，单凭科学定律我们便可以将宇宙中的一切都预言出来。

本书作者是当代最重要的广义相对论家和宇宙学家。

20世纪70年代他和彭罗斯一道证明了著名的奇点定理。之后他还证明了黑洞的面积定理，即随着时间增加黑洞的表面积不减。这很自然地使人将这面积和热力学的熵联想起来。

1973年，他考虑黑洞附近的量子效应，发现黑洞会像黑体那样发出辐射。其辐射的温度和黑洞质量成反比，这样黑洞就会因为辐射而慢慢变小，而温度却越变越高，它以最后一刻的爆炸而告终。黑洞辐射的发现具有极其基本的意义，它将引力、量子力学和热力学统一在一起。

1974年以后，他的研究转向量子引力论。他利用费恩曼的对历史求和方法，自然地处理时空的非平凡的拓扑效应，开创了引力热力学。

1980年，他的兴趣转向量子宇宙学，研究宇宙的无中生有的创生机制，企图一劳永逸地解决第一推动问题。

霍金的生平是非常富有传奇性的。在科学成就上，他是有史以来最杰出的科学家之一，而他的贡献是在他20年之久被肌萎缩性（脊椎）侧索硬化症禁锢在轮椅上的情形下做出的，这真正是空前的。因为他的贡献对于人类的观念有深远的影响，所以媒体对他早已广为报道。尽管如此，译者之一于1979年第一回见到他时的情景至今还历历在目。那是第一次参加他领导的小组的讨论班时，门打开后，忽然脑后响起一种非常微弱的电器的声音，回头一看，只见一个骨瘦如柴的人斜躺在电动轮椅上，他自己驱动着电开关。译者尽量保持礼貌而不显出过分吃惊，但是他对首次见到他的人对其残废程度的吃惊早已习惯。他要很费劲才能抬

起头来。在失声之前，他只能用非常微弱的变形的语言交流，这种语言只有在陪他工作、生活几个月后才能通晓。他不能写字，看书必须依赖于一种翻书页的机器，读文献时必须让人将每一页摊平在一张大办公桌上，然后他驱动轮椅如蚕吃桑叶般地逐页阅读。人们不得不对人类中居然有以这般坚强意志追求终极真理的灵魂从内心产生深深的敬意。他每天必须驱动轮椅从他的家——剑桥西路5号，经过美丽的剑河、古老的国王学院驶到银街的应用数学和理论物理系的办公室。该系为了他的轮椅行走方便特地修了一段斜坡。

在富有学术传统的剑桥大学，他目前担任着也许是有史以来最为崇高的教授职务，那是牛顿和狄拉克担任过的卢卡斯数学教授。

本书译者之一曾受教于霍金达4年之久，并在他的指导下完成了博士论文。从他对译者私事的帮助可以体会到，他是一位富有人情味的人。此书即是受霍金之托而译成中文，以供人类1/5的人口了解他的学说。

前言

史蒂芬·霍金

1996年5月

剑桥

我没有为《时间简史》的原版写前言。那是卡尔·萨根写的。我写了简短的“感谢”，有人建议我感谢每一个人。但是有些支持过我的基金会不甚高兴，由于被我提及而收到大量的申请。

我认为没有任何人，我的出版者、代理人，甚至我自己曾预料到这本书会这么畅销。它荣登伦敦《星期日时报》畅销书榜237周，这比任何书都久（显然，《圣经》和莎士比亚的书不算在内）。它被译成40来种文字，在全世界每750人就拥有一册，包括男人、妇女和儿童。正如纳珍·米尔伏德（我的前博士后）评论的：我的物理著作比麦当娜谈性的书还更好卖。

《时间简史》的成功表明，人们对于重大问题有广泛的兴趣：诸如我们从何而来？宇宙为何是这样子的？

我已趁此机会更新本书，并将从首版（1988年4月愚人节）以来理论和观测的新结果纳入。我新添了虫洞和时间旅行一章。爱因斯坦的广义相对论为我们提供了创生和维持虫洞的可能性，那是连接时空中不同区域的细管。于是，我们也许可以利用它们来进行星系之间快速旅行或在时间中旅行到过去。当然，我们从未邂逅到来自未来的人（也许我们曾经有过？）。对此我将给出一种可能的解释。

我还描述了今年在寻求“对偶性”或显然不同的物理理论之间的对应方面的进展。这些对应强烈地表明，存在一种完备的统一物理理论，但是它们也暗示，也许不可能用一个单独表述来表达这个理论。相反，在不同的情形下，我们必须使用基本理论的不同表述。这和描绘地球表面很相似，人们不能只用一张单独的地图，在不同的区域必须用不同的地

图。这就变革了我们的科学定律的统一观，但是它并没有改变最重要的一点：一族我们能够发现并理解的合理的定律制约着宇宙。

在观测方面，迄今最主要的发展是由COBE（宇宙背景探险者）和其他合作者测量的宇宙微波背景辐射中的起伏。这些起伏是创生的指纹，这些在光滑均匀的早期宇宙上的微小的初始无规性后来成长为星系、恒星以及在我们周围看到的所有结构。起伏的形式和无边界设想的预言相吻合。无边界设想说，宇宙在虚时间方向没有边界或边缘。为了区分这个设想和对背景中的起伏的其他可能的解释，还需要进一步的观测。然而，在几年之内，我们就应能知道，我们能否相信自己生活在一个完全自足的无始无终的宇宙之中。

第1章　我们的宇宙图象

一位著名的科学家（据说是伯特兰·罗素）曾经作过一次天文学讲演。他描述了地球如何围绕着太阳公转，而太阳又是如何围绕着称之为我们星系的巨大的恒星集团的中心公转。演讲结束之际，坐在房间后排的一位小个老妇人起立说道：“你讲的是一派胡言。实际上，世界是驮在一只巨大乌龟背上的平板。”这位科学家露出高傲的微笑，然后答道：“那么这只乌龟站在什么上面的呢？”“你很聪明，年轻人，的确很聪明”，老妇人说，“不过，这是一只驮着一只，一直驮下去的乌龟塔啊！”

大多数人会觉得，把我们的宇宙喻为一个无限的乌龟塔相当荒谬。但是我们凭什么就自认为知道得更好呢？我们对宇宙了解了多少？而我们又是如何知道的呢？宇宙从何而来，又将向何处去？宇宙有开端吗？如果有的话，在开端之前发生了什么？时间的本质是什么？它会有一个终结吗？物理学中最近的突破，使我们有可能为其中一些长期以来悬而未决的问题提供答案，而奇妙的新技术是实现这些突破的部分原因。对我们而言，这些答案也许有朝一日会变得和地球围绕着太阳公转那么显而易见——或许也会变得和乌龟塔一样荒谬，只有时间（不管其含义如何）才能裁决。

早在公元前340年，希腊哲学家亚里士多德在他的《论天》一书中，就能够对于地球是一个圆球而不是一块平板这个信念提出两个有力的论证。第一，他意识到，月食是由于地球运行到太阳与月亮之间引起的。地球在月亮上的影子总是圆的，这只有在地球本身为球形的前提下才成立。如果地球是一块平坦的圆盘，除非月食总是发生在太阳正好位于这个圆盘中心的正下方的时刻，否则地球的影子就会被拉长而成为椭圆形。第二，希腊人从旅行中知道，在南方地区观测北极星，比在较北地区，北极星在天空中显得较低。（由于北极星位于北极的正上方，所以它出现在北极的观察者的头顶上，而对于赤道上的某观察者，北极星刚好出现在地平线上。）

根据北极星在埃及和在希腊表观位置的差别，亚里士多德甚至估计出地球大圆长度为400000斯特迪亚。现在不能准确地知道，1斯特迪亚的长度究竟是多少，但也许是200码（1码＝0.9144米）左右，这样就使

得亚里士多德的估计大约为现在接受数值的两倍。希腊人甚至为地球是球形提供了第三个论证：否则何以从地平线驶来的船总是先露出船帆，然后才露出船身？

亚里士多德认为地球是不动的，太阳、月亮、行星和恒星都以圆周为轨道围绕着地球公转。他相信这些，是因为他认为地球是宇宙的中心，而圆周运动是最完美的；他的这种看法是基于某些神秘的原因。公元2世纪，这个思想被托勒密精制成一个完整的宇宙学模型。地球处于正中心，8个天球包围着它，这8个天球分别负载着月亮、太阳、恒星和5个当时已知的行星：水星、金星、火星、木星和土星（图1.1）。为了说明在天空中观察到的这些行星的相当复杂的轨道，人们认为它们本身沿着附在相应天球上的更小的圆周运动。最外层的天球携带着所谓的固定恒星，它们的相对位置总是保持不变，但是总体围绕着天空旋转。最后一层天球之外为何物一直不很清楚，但是它肯定不是人类所能观测到的宇宙部分。

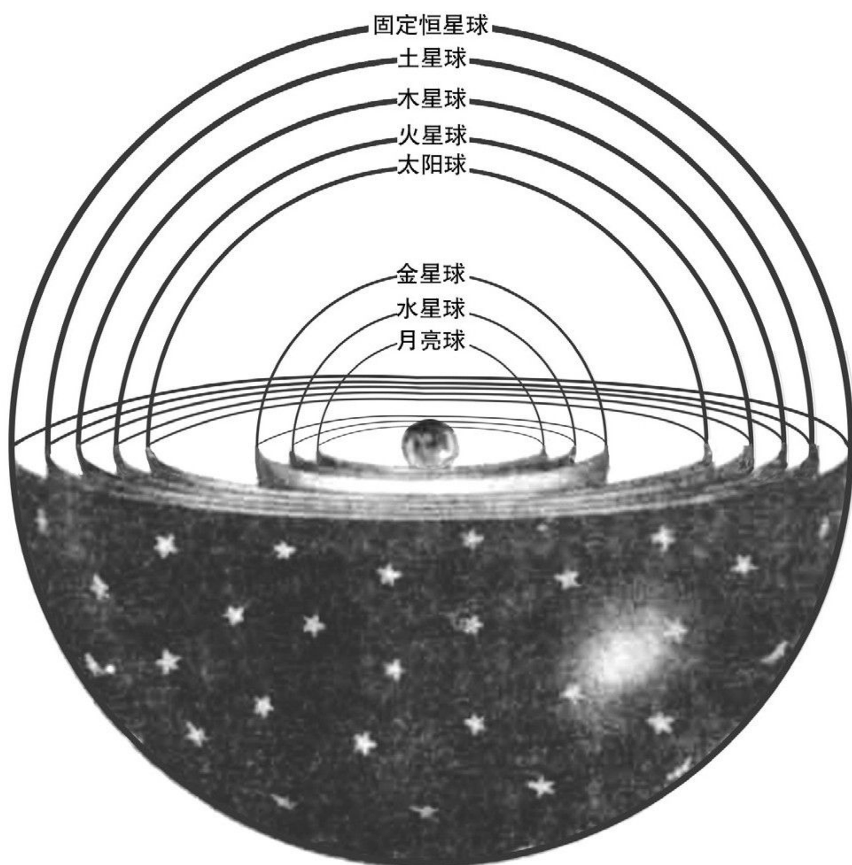


图1.1　从最里面往外面顺序为月亮球、水星球、金星球、太阳球、火星球、木星球、土星球和固定恒星球。最中心为地球

托勒密模型的系统可以相当精密地预言天体在天空中的位置。但是为了正确地预言这些位置，托勒密不得不假定，月亮遵循的轨道有时使它离地球的距离是其他时候的一半。这意味着月亮有时显得要比其他时候大一倍！托勒密承认这个瑕疵，但是尽管如此，他的模型被广泛地，虽然不是普适地接受。它被基督教会接纳为与《圣经》相一致的宇宙图象。这是因为它具有巨大优势，即在固定恒星天球之外为天堂和地狱留下了大量的空间。

然而，1514年波兰教士尼古拉·哥白尼提出了一个更简单的模型。（起初，也许哥白尼害怕被教会谴责为异端，所以将他的模型匿名地流传。）他的观念是，太阳静止地位于中心，而地球和行星们围绕着太阳作圆周运动。将近一个世纪以后，人们才认真接受他的观念。后来，两位天文学家——德国人约翰斯·开普勒和意大利人伽利略·伽利雷开始公开支持哥白尼理论，尽管它所预言的轨道还不能完全与观测相符合。直到1609年，亚里士多德和托勒密的理论才宣告死亡。那一年，伽利略用刚发明的望远镜来观测夜空。当他观测木星时，发现有几个小卫星或月亮围绕着它转动，这表明不像亚里士多德和托勒密设想的那样，并非所有东西都必须直接地围绕着地球转动（当然，仍然可能相信地球是静止地处于宇宙的中心，而木星的卫星沿着一种极其复杂的轨道围绕地球运动，表观上看来它们是围绕着木星转动。然而，哥白尼理论却简单得多了）。同时，约翰斯·开普勒修正了哥白尼理论，提出行星不是沿着圆周而是沿着椭圆（椭圆是拉长的圆）运动，从而最终使预言和观察相互一致了。

就开普勒而言，椭圆轨道仅仅是想当然的，并且是相当讨厌的假设，因为椭圆显然不如正圆那么完美。虽然他几乎偶然地发现椭圆轨道能很好地和观测相符合，但不能把它和他的磁力引起行星围绕太阳运动的思想相互调和起来。直到1687年，这一切才得到解释。这一年，艾萨克·牛顿爵士出版了他的《自然哲学的数学原理》，这也许是物理科学中有史以来最重要的著作。在这部著作中，牛顿不但提出物体如何在空间和时间中运动的理论，并且发展了为分析这些运动所需的复杂的数学。此外，牛顿还提出了万有引力定律。根据这条定律，宇宙中的任一物体都被另外的物体吸引。物体质量越大，相互距离越近，则相互之间的吸引力越大。正是这同一种力，使物体下落到地面。（一个苹果落到牛顿

的头上使他得到灵感的故事，几乎肯定是不足凭信的。牛顿自己说过的是，当他坐着陷入沉思之时，一个苹果的下落使他得到了万有引力的思想。）牛顿继而证明，根据他的定律，引力使月亮沿着椭圆轨道围绕着地球运行，而地球和其他行星沿着椭圆轨道围绕着太阳公转。

哥白尼的模型摆脱了托勒密的天球，以及与其相关的宇宙存在着自然边界的观念。“固定恒星”除了由于地球围绕着自身的轴自转引起的穿越天空的转动外，它们的位置显得固定不变，很自然会使人推测到固定恒星是和我们太阳类似的物体，只是比太阳离开我们远得多了。

按照他的引力理论，牛顿意识到恒星应该相互吸引，这样它们似乎不能保持基本上不动。难道它们不会都一起落到某处去吗？在1691年写给同时代另一位最重要的思想家理查德·本特里的一封信中，牛顿论证道，如果只有有限数目的恒星分布在一个有限的空间区域里，这确实是会发生的。但是另一方面，他推断说，如果存在无限数目的恒星，大体均匀地分布于无限的空间中，对它们而言，因为这时不存在一个中心落点，这种情形就不会发生。

当人们议论到无限时，这种论证是你会遭遇到的一种陷阱。在一个无限的宇宙中，因为在每一点的两边都有无限颗恒星，所以每一点都可以认为是中心。很久以后才意识到正确的方法，即是先考虑有限的情形，这时所有恒星都相互落到一起，然后加上在这个区域以外大体均匀分布的更多恒星，看事情会如何改变。按照牛顿定律，这额外的恒星对原先的那些根本没有什么影响，所以这些恒星还是同样快地落到一起。我们愿意加上多少恒星就可以加上多少，但是它们仍然总是向自身坍缩。现在我们知道，不可能存在一个无限静态的引力总是吸引的宇宙模型。

在20世纪之前从未有人提出过，宇宙是在膨胀或是在收缩，这有趣地反映了当时的思维风气。一般认为，宇宙要么以一种不变的状态存在了无限长的时间，要么以多多少少正如我们今天观察到的样子在有限久的过去创生。其部分的原因可能是，人们倾向于相信永恒的真理，也可能是由于从以下的观念得到安慰，即虽然他们会生老病死，但是宇宙必须是不朽的、不变的。

甚至那些意识到牛顿的引力理论导致宇宙不可能静止的人，也没有想到提出宇宙可能正在膨胀。相反，他们试图修正理论，使引力在非常

大距离下变成排斥的。这并没有太大影响他们对行星运动的预言，然而却允许恒星的无限分布保持平衡状态——邻近恒星之间的吸引力被远距离外的恒星来的斥力平衡。然而，现在我们相信，这样的平衡是不稳定的：如果某一区域内的恒星稍微相互靠近一些，它们之间的引力就会增强，并超过斥力的作用，因此这些恒星就会继续落到一起。反之，如果某一区域内的恒星稍微相互远离一些，斥力就起主导作用，并驱使它们离得更远。

另一个反对无限静止宇宙的异见通常归功于德国哲学家亨利希·奥勃斯，他在1823年撰写了这个理论。事实上，牛顿的一些同时代人已经提出过这个问题。甚至奥勃斯的文章也不是貌似有理地反驳这个模型的第一篇。不管怎么说，这是第一篇被广泛注意到的文章。其困难在于，在一个无限静止的宇宙中，几乎每一道视线必须终结于某一颗恒星的表面。这样，人们可以预料，整个天空甚至在夜晚都会像太阳那么明亮。奥勃斯反驳说，远处恒星的光线会被它穿越过的物质吸收而减弱。然而如果真是如此，这介于其间的物质最终会被加热到发出和恒星一样强的光为止。可以避免整个天空像太阳那么明亮的结论的唯一方法是，假定恒星并非永远那么明亮，而是在有限的过去才开始发光。在这种情况下，吸光物质还没加热，或者远处恒星的光线尚未到达我们这里。这就使我们面临着什么是首次引起恒星发光的问题。

当然，宇宙开端的问题比这早很久就被讨论过。根据一些早先的宇宙论和犹太教/基督教/穆斯林传统，宇宙在有限的并非非常遥远的过去的某个时刻起始。对于这样的一个开端，有一种论证是感到必须有“第一推动”来解释宇宙的存在。（在宇宙中，你总可以将一个事件解释为由另一个更早的事件引起的，但是只有当宇宙存在某个开端时，才能用这种方法解释它本身的存在。）圣·奥古斯丁在他的《上帝之城》的著作中提出了另一种论证。他指出，文明在进步，我们将记住创造这些功绩或发展技术的人们。这样，人也许还有宇宙，不可能已经存在了那么长的时间。圣·奥古斯丁根据《创世纪》一书，接受公元前5000年作为宇宙创生的时刻。（有趣的是，这和最近一个冰河时代的结束，大约公元前10000年相距不远。考古学家告诉我们，文明实际上正是从那时开始的。）

另一方面，亚里士多德和其他大多数希腊哲学家不喜欢创生的思想，因为它带有太多的神学干涉的味道。所以他们相信，人类及其周围

的世界已经并将继续永远存在。古人已经考虑到上述文明进步的论点，用周期性洪水或其他灾难的出现，使人类重复地回到文明的开初，来回答上面的诘难。

1781年，哲学家伊曼努尔·康德发表了里程碑般的（也是非常晦涩难懂的）著作——《纯粹理性批判》。在这本书中，他深入地考察了关于宇宙在时间上是否有开端、在空间上是否有限的问题。他称这些问题为纯粹理性的二律背反（也就是矛盾）。因为他感到存在同样令人信服的论据，来证明宇宙有开端的正命题，以及宇宙已经存在无限久的反命题。他对正命题的论证是：如果宇宙没有一个开端，则任何事件之前必有无限的时间。他认为这是荒谬的。他对反命题的论证是：如果宇宙有一开端，在它之前必有无限的时间，为何宇宙必须在某一特定的时刻开始呢？事实上，他对正命题和反命题用同样的论证来辩护。它们都是基于他隐含的假设，即不管宇宙是否存在了无限久，时间均可无限地倒溯回去。我们将会看到，在宇宙开端之前时间概念是没有意义的。这一点是圣·奥古斯丁首先指出的。当他被问及："上帝在他创造宇宙之前做什么？"奥古斯丁并没有这样回答："他正为诘问这类问题的人准备地狱。"而是说时间是上帝创造的宇宙的一个性质，在宇宙开端之前不存在。

当大部分人深信一个本质上静止不变的宇宙时，关于它有无开端的问题，实在是一个形而上学或神学的问题。按照宇宙存在无限久的理论，或者按照宇宙以它似乎已经存在了无限久的样子在某一个有限时刻起始的理论，我们可以同样好地解释所观察到的事实。但在1929年，埃德温·哈勃作出了一个里程碑式的观测，即不管你往哪个方向观测，远处的星系都正急速地飞离我们而去。换言之，宇宙正在膨胀。这意味着，在早先的时刻星体更加相互靠近。事实上，似乎在大约100亿至200亿年之前的某一时刻，它们刚好在同一地方，所以那时候宇宙的密度为无限大。这个发现最终将宇宙开端的问题带进了科学的王国。

哈勃的发现暗示存在一个叫作大爆炸的时刻，当时宇宙的尺度无限小，而且无限紧密。在这种条件下，所有科学定律并因此所预见将来的能力都崩溃了。如果在此时刻之前有过一些事件，它们将不可能影响现在发生的东西。因为它们没有任何观测的后果，所以可不理睬其存在。由于更早的时间根本没有定义，所以在这个意义上，人们可以说，时间在大爆炸时有一开端。必须强调的是，这个时间的开端和早先考虑的非

常不同。在一个不变的宇宙中，时间的端点是必须由宇宙之外的存在物赋予的某种东西；宇宙的开端并没有物理的必然性。人们可以想像上帝在过去从字面上说的任何时刻创生了宇宙，如果宇宙正在膨胀，那么何以宇宙有一个开端似乎就有了物理的原因。人们仍然可以想象，上帝是在大爆炸的瞬间创生宇宙，或者甚至在更晚的时刻，以使它看起来就像发生过大爆炸似的方式创生，但是设想在大爆炸之前创生宇宙是没有意义的。大爆炸宇宙并没有排斥造物主，只不过对他何时从事这工作加上限制而已！

为了谈论宇宙的性质和讨论诸如它是否存在起始或终结的问题，你必须清楚什么是科学理论。我将采用素朴的观点，即理论只不过是宇宙或它的受限制部分的模型，以及一套把这模型中的量和我们做的观测相联系的规则。它只存在于我们的头脑中，不再具有任何其他（不管在任何意义上）的实在性。一个好的理论必须满足以下两个要求：首先，这个理论必须能准确地描述大量的观测——这些观测是根据只包含少数任选的元素的模型所做出的；其次，这个理论能对未来观测的结果作出明确的预言。例如，亚里士多德相信恩培多克利的关于任何东西是由四元素即土、气、火和水组成的理论，该理论是足够简单的了，但它没有做出任何明确的预言。另一方面，牛顿的引力理论是基于甚至更为简单的模型，在此模型中两物体用一种力相互吸引，该力和被称为它们质量的量成正比，并和它们之间的距离的平方成反比。然而，它以很高的精确性预言了太阳、月亮和行星的运动。

在只是一个假设的意义上来讲，任何物理理论总是临时性的：你永远不可能证明它。不管多少回实验的结果和某个理论相一致，你永远不可能断定下一次结果不和它矛盾。另一方面，哪怕你只要找到一个和理论预言不一致的观测事实，即可证伪之。正如科学哲学家卡尔·波普尔强调的，一个好的理论的特征是，它能给出许多在原则上可以被观测否定或证伪的预言。每回观察到与这个预言相符的新的实验，则这一理论就存活，并且增加了我们对它的信任度；然而若有一个新的观测与之不符，则我们只得抛弃或修正这一理论。

这被认为是迟早总会发生的事，但是你总可以质疑实现该观测的人的能力。

在现实中经常发生的是，设计出的新理论实际上是原先理论的一个扩展。例如，非常精确地观测水星，发现它的运动和牛顿引力理论预言

之间有一个微小的差异。爱因斯坦的广义相对论预言了和牛顿理论略微不同的运动。爱因斯坦的预言和观测到的相符合，而牛顿理论做不到，这个事实是对这个新理论的一个关键的证实。然而在我们正常处理的情形下，牛顿理论和广义相对论的预言之间差异非常小，所以为了所有实用的目的，我们仍然使用牛顿理论。（牛顿理论还有一个巨大的优点，用它计算比用爱因斯坦理论简单多了！）

科学的终极目的是提供描述整个宇宙的单一的理论。然而，大多数科学家遵循的方法是把问题分成两部分。首先，存在一些定律，这些定律告诉我们宇宙如何随时间变化。（如果我们知道在任一时刻宇宙是什么样子的，这些定律就告诉我们它在未来任何时刻是什么样子。）第二，存在宇宙初始状态的问题。有些人觉得科学只应关心第一部分，他们将初始状态的问题看作玄学或宗教的事体。他们会说，无所不能的上帝可以随心所欲地起始宇宙。那也许是真的，但是，倘若那样，他也可以使宇宙以完全任意的方式演化。可是，似乎他选择使宇宙以一种非常规则的，按照一定规律的方式演化。所以，看来可以同样合理地假定，也存在着制约初始状态的定律。

一蹴而就地设计一种能描述整个宇宙的理论，看来是非常困难的。相反，我们将这个问题分成许多小块，并发明许多部分理论。每一部分理论描述和预言一定有限范围的观测，同时忽略其他量的效应或用简单的一组数来代表。这个方法可能全错。如果宇宙中的每一件东西都以非常基本的方式依赖于其他的任何一件东西，用隔离法研究问题的部分也许不可能逼近其完全的答案。尽管如此，这肯定是我们在过去取得进展的方法。牛顿引力理论又是一个经典的例子，它告诉我们两个物体之间的引力只取决于与每个物体相关的一个数——它的质量，而与物体由何物组成无关。这样，人们不需要太阳和行星结构和成分的理论就可以计算它们的轨道。

今天，科学家按照两个基本的理论——广义相对论和量子力学来描述宇宙。它们是20世纪上半叶的伟大的智慧成就。广义相对论描述引力和宇宙的大尺度结构，也就是从只有几英里直到大至1亿亿亿（1后面跟24个0）英里（1英里＝1.609千米），即可观测到的宇宙的尺度的结构。另一方面，量子力学处理极小尺度，例如万亿分之一英寸（1英寸＝2.54厘米）的现象。然而可惜的是，这两个理论不是相互协调的——它们不可能都对。当代物理学的一个主要的努力，以及本书的主题，即

是寻求一个能将其合并在一起的新理论——量子引力理论。我们还没有这样的理论，要获得这个理论，我们可能还有相当长的路要走，然而我们已经知道了这个理论所应具备的许多性质。在以下几章，人们将会看到，我们对量子引力理论所应有的预言已经知道得相当多。

现在，如果你相信宇宙不是任意的，而是被明确的定律制约的，你最终必须将这些部分理论合并成一个能描述宇宙中万物的完整统一理论。然而，在寻求这样的完整统一理论中有一个基本的矛盾。在前面概括的关于科学理论的思想中，假定我们是理性的生物，既可以随心所欲地观测宇宙，又可以从观察中得出逻辑推论。在这样的方案里可以合理地假设，我们可以越来越接近制约我们宇宙的定律。然而，如果真有一个完整的统一理论，它大概也将决定我们的行动。这样，理论本身就决定了我们对之探索的结果！那么为什么它保证我们从证据得到正确的结论？难道它不也可以同样地保证我们引出错误的结论吗？或者根本没有结论？

对于这个问题，我所能给出的回答是基于达尔文的自然选择学说。在任何自繁殖的群体中，总是存在着不同个体在遗传物质和发育上的变异。这些差异表明，某些个体比其他个体对它们周围的世界更能引出正确的结论，并去适应它。这些个体更可能存活、繁殖，因此它们的行为和思维的模式将越来越起主导作用。以下这一点在过去肯定是真的，即我们称之为智慧和科学发现的东西给我们带来了存活的好处。这种情况是否仍会如此没有这么清楚：我们的科学发现可以轻易地毁灭我们的一切。即使不是这样，一个完整的统一理论对于我们存活的机会不会有很大影响。然而，假定宇宙已经以规则的方式演化至今，我们可以预期，自然选择赋予我们的推理能力在探索完整统一理论时仍然有效，并因此不会导致我们得到错误的结论。

因为，除了最极端的情况外，我们已有的部分理论足以对所有的一切作出精确的预言。所以，要为探索宇宙的终极理论寻找实用的理由，看来就非常困难了。（值得指出的是，虽然类似的论点在过去既可以用来反对相对论，又可以用来反对量子力学，但这些理论已给我们带来了核能和微电子学的革命！）所以，发现一个完整的统一理论可能对我们种族的存活无助，甚至也不会影响我们的生活方式。然而自从文明开始以来，人们即不甘心于将事件看作互不相关，不可理解。他们渴望理解世界的根本秩序。今天我们仍然很想知道，我们为何在此？我们从何而

来？人类求知的最深切的意愿足以为我们从事的不断探索提供充足的理由。而我们的目标恰恰正是对于我们生存其中的宇宙作出完整的描述。

第2章　空间和时间

我们现在关于物体运动的观念来自于伽利略和牛顿。在他们之前，人们相信亚里士多德，他说物体的自然状态是静止的，并且只有在受到力或冲击的推动时才运动。这样，重的物体比轻的物体下落得更快，因为它受到更大的将其拉向地球的力。

亚里士多德的传统观点还以为，人们依靠纯粹思维即可以找出所有制约宇宙的定律：不必要用观测去检验之。这样，在伽利略之前，没有一个人想看看不同质量的物体是否确实以不同速度下落。据说，伽利略从比萨斜塔上将重物落下，从而证明了亚里士多德的观点是错的。这故事几乎不足以信，但是伽利略的确做了一些等效的事——让不同质量的球沿光滑的斜面滚下。这情况类似于重物的垂直下落，只是因为速度小而更容易观察而已。伽利略的测量指出，不管物体的质量是多少，其速度增加的速率是一样的。例如，你在一个沿水平方向每走10米即下降1米的斜面上释放1个球，则1秒钟后球的速度为每秒1米，2秒钟后为每秒2米，等等，而不管这个球多重。当然，一个铅锤比一片羽毛下落得更快些，那只是因为空气阻力将羽毛的速度降低。如果一个人释放两个不受空气阻力的物体，例如两个不同的铅锤，它们以同样的速度下降。在没有空气阻碍东西下落的月球上，航天员大卫·斯各特进行了羽毛和铅锤实验，并且发现两者确实同时落到月球上。

牛顿把伽利略的测量当作他的运动定律的基础。在伽利略的实验中，当物体从斜坡上滚下时，它一直受到不变外力（它的重力）的作用，其效应是使它恒定地加速。这表明，力的真正效应总是改变物体的速度，而不是像原先想象的那样，仅仅使之运动。同时，它还意味着，只要物体没有受到外力，它就会以同样的速度保持直线运动。这一思想首次在牛顿于1687年出版的《自然哲学的数学原理》一书中明确地陈述出来，并被称为牛顿第一定律。牛顿第二定律给出物体在受力时发生的现象：物体在被加速或改变其速度时，其改变率与所受的外力成比例。（例如，如果力加倍，则加速度也将加倍。）物体的质量（或物质的量）越大，则加速度越小（以同样的力作用于具有两倍质量的物体时只产生一半的加速度）。小汽车可提供一个熟知的例子，发动机的功率越大，则加速度越大，但是小汽车越重，则对于同样的发动机，则加速度

越小。除了他的运动定律，牛顿还发现了描述引力的定律：任何两个物体都相互吸引，其引力大小与每个物体的质量成比例。于是，如果其中一个物体（例如A）的质量加倍，则两个物体之间的引力加倍。这是你能预料得到的，因为新的物体A可看成两个具有原先质量的物体，每一个用原先的力来吸引物体B，所以A和B之间的总力加倍。而如果，比如说，其中一个物体质量大到原先的2倍，另一物体大到3倍，则引力就大到6倍。现在人们可以看到，为何落体总以同样的速率下降：具有两倍质量的物体受到将其向下拉的2倍的引力，但它的质量也大到2倍。按照牛顿第二定律，这两个效应刚好相互抵消，所以在所有情形下加速度都是相同的。

牛顿引力定律还告诉我们，物体之间的距离越远，则引力越小。牛顿引力定律表明，一个恒星的引力只是一个类似恒星在距离小一半时的引力的1/4。这个定律极其精确地预言了地球、月亮和其他行星的轨道。如果这一定律中恒星的万有引力随距离减小或者增大得快一些，则行星轨道不再是椭圆的了，它们就会以螺旋线的形状要么盘旋到太阳上去，要么从太阳逃逸。

亚里士多德和伽利略—牛顿观念的巨大差异在于，亚里士多德相信一个优越的静止状态，任何没有受到外力和冲击的物体都处于这种状态。特别是他以为地球是静止的。但是从牛顿定律可以推断，并不存在唯一的静止标准。人们可以讲，物体A静止而物体B以不变的速度相对于物体A运动，或物体B静止而物体A运动，这两种讲法是等价的。例如，我们暂时不理睬地球的自转和它围绕太阳的公转，则可以讲地球是静止的，一辆有轨电车以每小时30英里的速度向东运动，或有轨电车是静止的，而地球以每小时30英里的速度向西运动。如果一个人在有轨电车上做运动物体的实验，所有牛顿定律仍然都成立。例如，在有轨电车上打乒乓球，人们将会发现，正如在铁轨旁一张台桌上的球一样，乒乓球服从牛顿定律，所以无法得知究竟是火车还是地球在运动。

缺乏静止的绝对标准意味着，人们不能确定，在不同时间发生的两个事件是否发生在空间的相同位置上。例如，假定在有轨电车上我们的乒乓球直上直下地弹跳，在1秒钟前后两次撞到桌面上的同一处。在铁轨上的人来看，这两次弹跳似乎发生在大约相距13米的不同的位置上，因为在这两回弹跳的时间间隔里，有轨电车已在铁轨上走了这么远。

这样，不存在绝对静止意味着不能像亚里士多德相信的那样，给事

件指定一个绝对的空间位置。事件的位置以及它们之间的距离对于在有轨电车上和铁轨上的人来讲是不同的，所以没有理由以为一个人的立场比别人的更优越。

牛顿对不存在绝对位置或所谓绝对空间非常忧虑，因为这和他的绝对上帝的观念不一致。事实上，即使他的定律隐含着绝对空间的不存在，他也拒绝接受。因为这个非理性的信仰，他受到许多人的严厉批评，其中最有名的是贝克莱主教。他是一个相信所有的物质实体、空间和时间都是虚妄的哲学家。当人们将贝克莱的见解告诉著名的约翰逊博士时，他用脚趾踢到一块大石头上，并大叫道：“我要这样驳斥他！”

亚里士多德和牛顿都相信绝对时间。也就是说，他们相信人们可以毫不含糊地测量两个事件之间的时间间隔，只要用好的钟，不管谁去测量，这个时间都是一样的。时间相对于空间是完全分离并且独立的。这就是大部分人当作常识的观点。然而，我们必须改变这种关于空间和时间的观念。虽然这种显而易见的常识可以很好地对付运动甚慢的诸如苹果、行星的问题，但在处理以光速或接近光速运动的物体时却根本无效。

1676年，丹麦的天文学家欧尔·克里斯琴森·罗默第一次发现了，光以有限但非常高的速度旅行的事实。他观察到，木星的卫星不是以等时间间隔从木星背后出来，不像如果卫星以不变速度围绕木星运动时，人们会预料的那样。当地球和木星都围绕着太阳公转时，它们之间的距离在变化着。罗默注意到，我们离木星越远则木星的月食出现得越晚。他论证道，因为当我们离开更远时，光从木星卫星那里要花更长的时间才能到达我们这里。然而，他测得的木星到地球的距离变化不是非常准确，与现在的每秒186000英里的值相比较，他所测的光速的数值为每秒140000英里。尽管如此，罗默不仅证明了光以有限的速度行进，并且测量了那个速度，他的成就是卓越的——要知道，这一切都是在牛顿发表《自然哲学的数学原理》之前11年做出的。

直到1865年，英国的物理学家詹姆斯·麦克斯韦成功地将当时用以描述电力和磁力的部分理论统一起来以后，才有了光传播的正确的理论。麦克斯韦方程预言，在合并的电磁场中可以存在波动的微扰，它们以固定的速度，正如池塘水面上的涟漪那样行进。如果这些波的波长（两个相邻波峰之间的距离）为1米或更长一些，它们就是我们所谓的射电波。更短波长的波称作微波（几厘米）或红外线（长于万分之一厘

米）。可见光的波长在一百万分之四十至一百万分之八十厘米之间。更短的波长被称为紫外线、X射线和伽马射线。

麦克斯韦理论预言，射电波或光波应以某一固定的速度行进。但是牛顿理论已经摆脱了绝对静止的观念，所以如果假定光以固定的速度行进，人们就必须说清这固定的速度是相对于何物来测量的。因此有人提出，存在着一种无所不在的称为“以太”的物质，甚至在“真空的”空间中也是如此。正如声波在空气中行进一样，光波应该通过以太行进，所以它们的速度应是相对于以太而言的。相对于以太运动的不同观察者，会看到光以不同的速度冲他们而来，但是光对以太的速度保持不变。特别是当地球在它围绕太阳的轨道穿过以太时，在地球通过以太运动的方向测量的光速（当我们对光源运动时）应该大于在与运动垂直方向测量的光速（当我们不对光源运动时）。1887年，阿尔伯特·迈克耳孙（他后来成为美国第一位诺贝尔物理学奖获得者）和爱德华·莫雷在克里夫兰的凯思应用科学学校进行了一个非常仔细的实验。他们将沿地球运动方向以及垂直于此方向的光速进行比较。使他们大为惊奇的是，他们发现这两个光速完全一样！

在1887年至1905年之间，依据相对于以太运动的物体收缩和时钟变慢的机制，出现过好几个解释迈克耳孙—莫雷实验的尝试，最著名者为荷兰物理学家亨得利克·洛伦兹做出的。然而，一位迄至当时还默默无闻的瑞士专利局的职员阿尔伯特·爱因斯坦，在1905年的一篇著名的论文中指出，只要人们愿意抛弃绝对时间观念的话，整个以太的观念则是多余的。几个星期之后，法国第一流的数学家亨利·庞加莱也提出类似的观点。爱因斯坦的论证比庞加莱的论证更接近物理，后者将其考虑为数学问题。通常这个新理论归功于爱因斯坦，但人们不会忘记庞加莱的名字在其中起了重要的作用。

这个被称为相对论的基本假设是，不管观察者以任何速度作自由运动，相对于他们而言，科学定律都应该是一样的。这对于牛顿的运动定律当然是对的，但是现在这个观念被扩展到包括麦克斯韦理论和光速：不管观察者运动多快，他们应测量到一样的光速。这简单的观念有一些非凡的结论。可能最著名者莫过于质量和能量的等价，这可用爱因斯坦著名的方程$E=mc^2$来表达（E是能量，m是质量，c是光速），以及没有任何东西可以行进得比光还快的定律。由于能量和质量的等价，物体由于它的运动具有的能量应该加到它的质量上去。换言之，要加速它将更

为困难。这个效应只有当物体以接近于光速的速度运动时才有实际的意义。例如，以10%光速运动的物体的质量只比原先增加了0.5%，而以90%光速运动的物体，其质量变得比正常质量的2倍还多。当一个物体接近光速时，它的质量上升得越来越快，这样它需要越来越多的能量才能进一步加速上去。实际上它永远不可能达到光速，因为那时质量会变成无限大，而根据质量能量等价原理，这就需要无限大的能量才能做到。由于这个原因，相对论限制了物体运动的速度：任何正常的物体永远以低于光速的速度运动，只有光或其他没有内禀质量的波才能以光速运动。

相对论的一个同等非凡的推论是，它变革了我们空间和时间的观念。在牛顿理论中，如果有一光脉冲从一处发到另一处，（由于时间是绝对的）不同的观测者对这个行程所花的时间不会有异议，但是（因为空间不是绝对的）他们在光行进的距离上不会总取得一致的意见。由于光速正是它行进过的距离除以花费的时间，不同的观察者就测量到不同的光速。另一方面，在相对论中，所有的观察者必须在光以多快速度行进上取得一致意见。然而，在光行进过多远的距离上，他们仍然不能取得一致意见。因此，现在他们对光要花费多少时间上应该也不会取得一致意见。（花费的时间正是用光速——对这一点所有的观察者都意见一致——去除光行进过的距离——对这一点他们意见不一致。）换言之，相对论终结了绝对时间的观念！看来每个观察者都一定有他自己的时间测度，这是用他自己所携带的钟记录的，而不同观察者携带的同样的钟的读数不必一致。

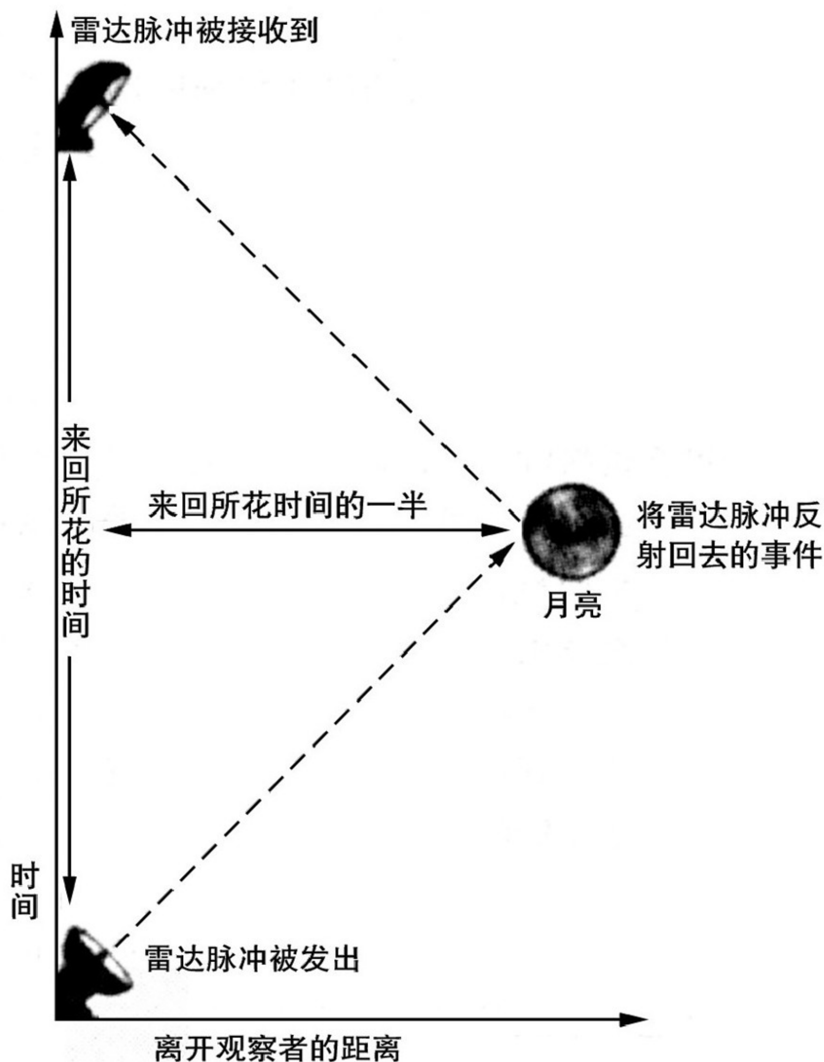


图2.1　时间用垂直坐标测量，离开观察者的距离用水平坐标测量。观察者在空间和时间里的路径用左边的垂线表示。到事件去和从事件来的光线的路径用对角线表示

每个观察者都可以利用雷达发出光或射电波脉冲来说明一个事件在何处何时发生。一部分脉冲在事件反射回来后，观察者可在他接收到回波时测量时间。事件的时间可认为是脉冲被发出和反射被接收的两个时刻的中点：而事件的距离可取这来回行程时间的一半乘以光速（在这个意义上，一个事件是发生在空间的单独一点以及指定时间的一点的某件事）。这个思想被显示在（图2.1）上。这是时空图的一个例子。利用这个步骤，作相互运动的观察者对同一事件可赋予不同的时间和位置。没

有一个特别的观察者的测量比任何其他人的更正确，但是所有这些测量都是相关的。只要一个观察者知道其他人的相对速度，他就能准确算出其他人会赋予同一事件的时间和位置。

现在我们正是用这种方法来准确地测量距离，因为我们可以把时间比长度测量得更为准确。实际上，米是被定义为光在以铯原子钟测量的0.000000003335640952秒内行进的距离（取这个特别数字的原因是，它对应于历史上的米的定义——按照保存在巴黎的特定铂棒上的两个刻度之间的距离）。同样地，我们可以用叫作光秒的更方便的新长度单位，这就是简单地定义为光在1秒中行进的距离。现在，我们在相对论中按照时间和光速来定义距离，从而自然而然地，每个观察者都测量出光具有同样的速度（按照定义为每0.000000003335640952秒之1米）。没有必要引入以太的观念，正如迈克耳孙—莫雷实验显示的那样，以太的存在是无论如何检测不到的。然而，相对论迫使我们从根本上改变了我们的时间和空间观念。我们必须接受，时间不能完全脱离开和独立于空间，而必须和空间结合在一起形成所谓的时空的客体。

我们通常的经验是可以用3个数或坐标去描述空间中的一点的位置。譬如，人们可以说屋子里的一点离开一堵墙7英尺（1英尺＝0.3048米），离开另一堵墙3英尺，并且比地面高5英尺。或者人们也可以用一定的纬度、经度和海拔来指定该点。人们可以自由地选用任何3个合适的坐标，虽然它们只在有限的范围内有效。人们不是按照在伦敦皮卡迪里广场以北和以西多少英里以及高于海平面多少英尺来指明月亮的位置，取而代之，人们可用离开太阳、离开行星轨道面的距离以及月亮与太阳的连线和太阳与临近的一个恒星——例如比邻星——连线之夹角来描述它的位置。甚至这些坐标对于描写太阳在我们星系中的位置，或我们星系在本星系群中的位置也没有太多用处。事实上，人们可按照一族相互交叠的坐标碎片来描述整个宇宙。在每一碎片中，人们可用不同的3个坐标的集合来指明点的位置。

一个事件是在特定时刻和在空间中特定的一点发生的某件事。这样，人们可以用4个数或坐标来指定它。再说一遍，坐标系的选择是任意的；人们可以使用任何3个定义好的空间坐标和任何时间测度。在相对论中，在时间和空间坐标之间没有真正的差别，犹如在任何两个空间坐标之间没有真正的差别一样。人们可以选择一族新的坐标，比如说，第一个空间坐标是旧的第一和第二空间坐标的组合。例如，测量地球上

一点的位置不用在伦敦皮卡迪里广场以北和以西的里数，而是用在它的东北和西北的里数。类似的，人们在相对论中可以用新的时间坐标，它是旧的时间（以秒作单位）加上往北离开皮卡迪里的距离（以光秒为单位）。

将一个事件的4个坐标当作指定其在所谓的时空的四维空间中位置的手段经常是有帮助的。四维空间是不可想象的。对我个人来说，摹想三维空间已经足够困难！然而很容易画出二维空间图，例如地球的表面（地球的表面是两维的，因为可以用两个坐标，例如纬度和经度，来指明一点的位置。）我将通常使用二维图，向上增加的方向是时间，水平方向是其中一个空间坐标。不管另外两个空间坐标，或者有时用透视法将其中一个表示出来（这些被称为时空图，如图2.2所示）。例如，在图2.2中，时间是向上的，并以年作为测量单位，而沿着从太阳到比邻星连线的距离在水平方向上以英里为单位来测量。图中的左边和右边的垂线表示太阳和比邻星通过时空的路径。从太阳发出的光线沿着对角线走，并且要花费4年的时间才能从太阳到达比邻星。

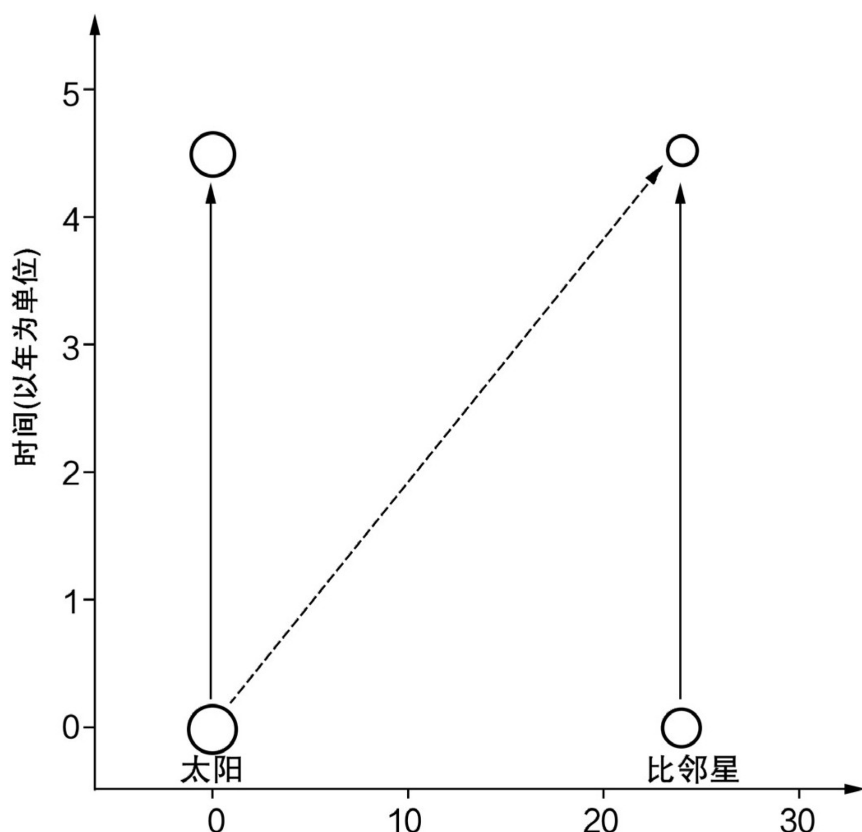


图2.2　离开太阳的距离[以10^{12}英里（1英里＝1.609千米）为单位]

正如我们已经看到的，麦克斯韦方程预言，不管光源的速度如何，光速应该是一样的，这已被精密的测量证实。由此推出，如果有一个光脉冲从一特定的空间点在一特定时刻发出，在时间的进程中，它就会作为一个光球面发散开来，而光球面的形状和大小与源的速度无关。在一百万分之一秒后，光就散开成一个半径为300米的球面；一百万分之二秒后，半径变成600米，等等。这正如同将一块石头扔到池塘里，水表面的涟漪向四周散开一样，涟漪作为一个圆周散开并随时间越变越大。如果人们把不同时刻涟漪的快照逐个堆叠起来，扩大的水波圆周就会画出一个圆锥，其顶点正是石块击到水面的地方和时刻。（图2.3）。类似地，从一个事件散开的光在（四维的）时空里形成了一个（三维的）圆锥，这个圆锥称为事件的将来光锥。以同样的方法可以画出另一个称为过去光锥的圆锥，它表示所有可以用一个光脉冲传播到该事件的事件集合（图2.4）。

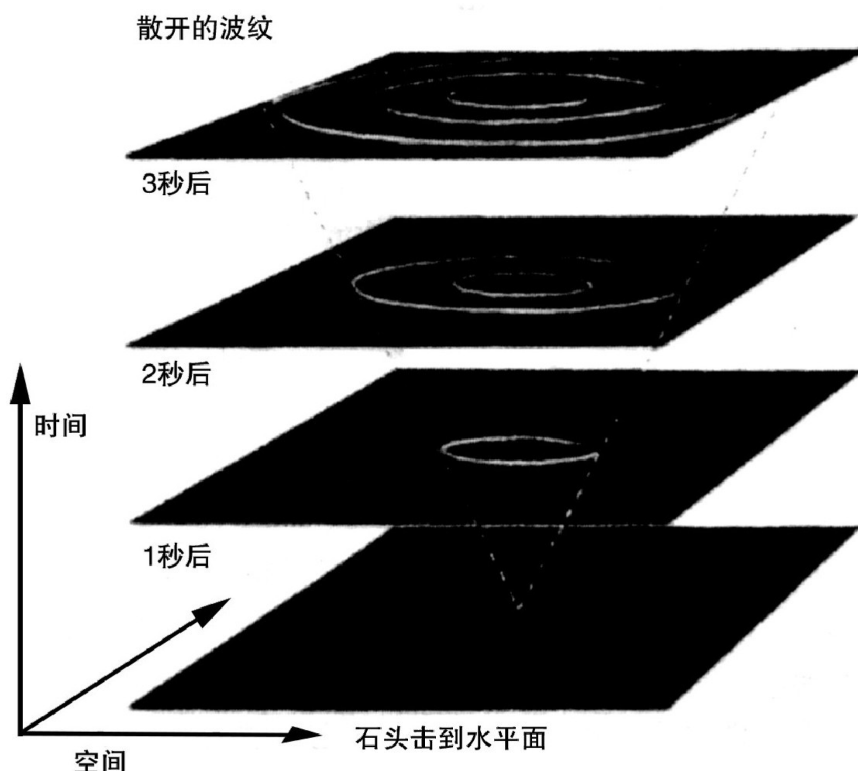


图2.3

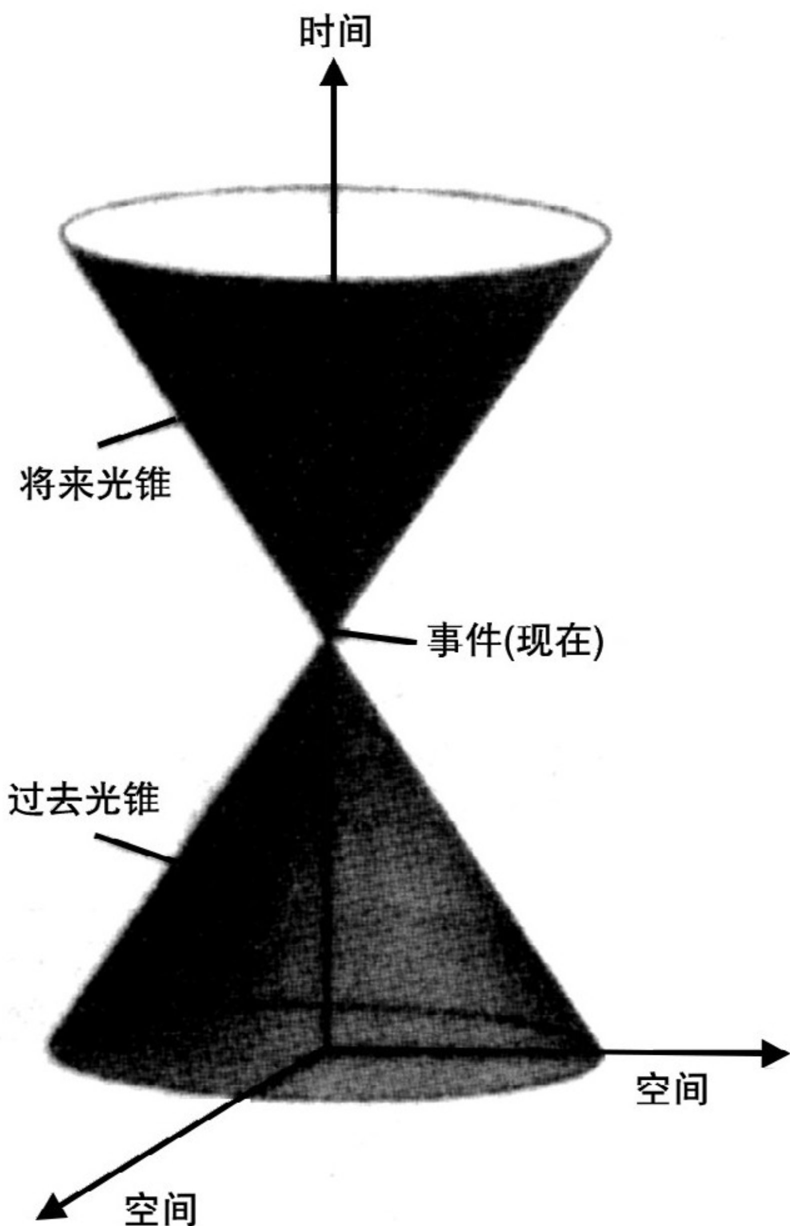


图2.4

对于给定的事件P，人们可以将宇宙中的其他事件分成三类。从事件P出发由一个粒子或者波以等于或小于光速的速度行进能到达的那些事件称为属于P的将来。它们处于从事件P发射的膨胀的光球面之内或之上。这样，在时空图中它们就处于P的将来光锥的里面或上面。因为没有任何东西比光行进得更快，所以在P所发生的事情只能影响在P的将来

中的事件。

类似地，P的过去可被定义为下述的所有事件的集合，从这些事件可能以等于或小于光速的速度行进到达事件P。这样，它就是能够影响发生在P的事件的所有事件的集合。不处于P的将来或过去的事件被称为处于P的他处（图2.5）。在这种事件处所发生的事情既不能影响发生在P的事件，也不受发生在P的事件的影响。例如，假定太阳就在此刻停止发光，它不会对此刻的地球上的事情发生影响，因为它们是在太阳熄灭这一事件的他处（图2.6）。我们只能在8分钟之后才知道这一事件，这是光从太阳到达我们所花费的时间。只有到那时候，地球上的事件才在太阳熄灭这一事件的将来光锥之内。类似地，我们也不知道这一时刻发生在宇宙中更远处的事：我们看到的从很远星系来的光是在几百万年之前发出的，至于我们看到的最远物体，光是在大约80亿年前发出的。这样，当我们看宇宙时，我们是在看它的过去。

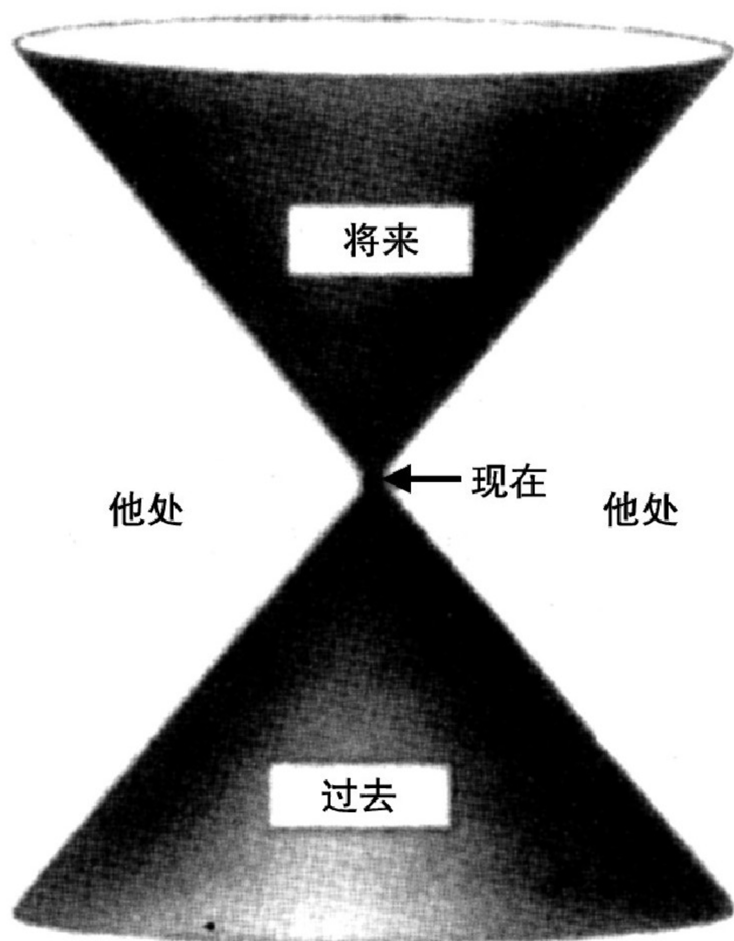


图2.5

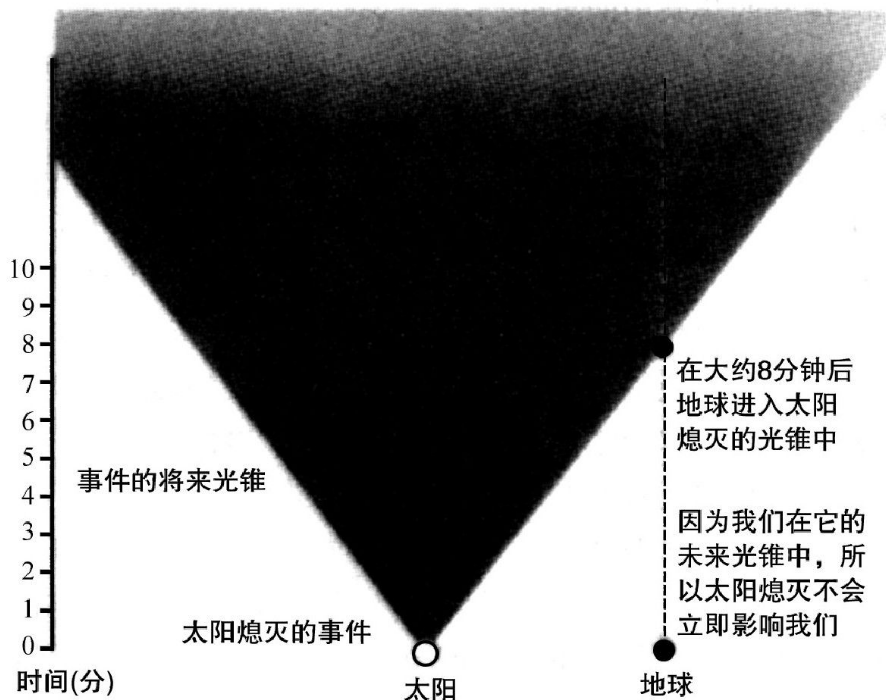


图2.6

如果人们忽略引力效应，正如爱因斯坦和庞加莱在1905年那样做的，人们就得到了称为狭义相对论的理论。对于时空中的每一事件我们都可以做一个光锥（所有从该事件发出的光的可能路径的集合），由于在每一事件处在任一方向上的光的速度都是一样的，所以所有光锥都是全等的，并朝着同一方向。这一理论又告诉我们，没有任何东西行进得比光更快。这意味着，通过空间和时间的任何物体的轨迹必须由一根线来表示，而这根线落在它上面的每一事件的光锥之内（图2.7）。狭义相对论非常成功地解释了如下事实：对所有观察者而言，光速都是一样的（正如迈克耳孙—莫雷实验所展示的那样），并成功地描述了当物体以接近于光速运动时会发生什么。然而，它和牛顿引力理论不相协调。牛顿理论说，物体之间相互吸引，其吸引力依赖于它们之间的距离。这意味着，如果我们移动其中一个物体，另一物体所受的力就会立即改变。或换言之，引力效应必须以无限速度行进，而不像狭义相对论要求的那样，只能以等于或低于光速的速度行进。爱因斯坦在1908年至1914年之间进行了多次不成功的尝试，企图找到一个和狭义相对论协调的引力理论。1915年，他终于提出了今天我们称为广义相对论的理论。

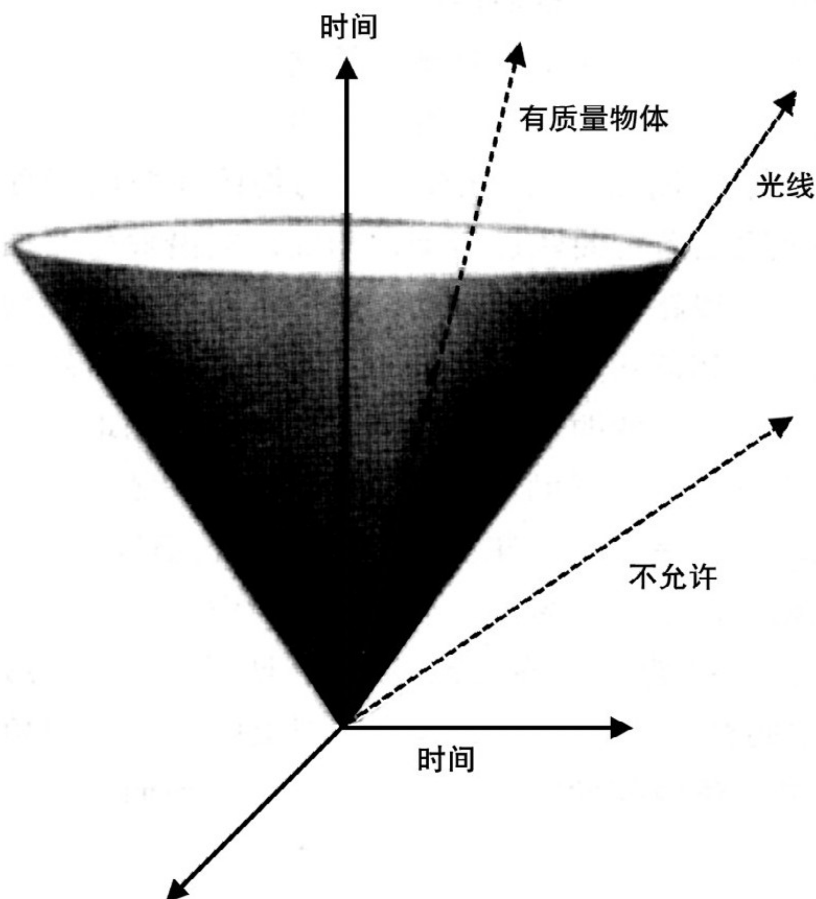


图2.7

爱因斯坦提出了革命性的思想，即引力不像其他种类的力，它只不过是时空不是平坦的这一事实的结果，而早先人们假定时空是平坦的。时空中的质量和能量的分布使它弯曲或“翘曲”。像地球这样的物体并非由于称为引力的力使之沿着弯曲轨道运动，相反，它沿着弯曲空间中最接近于直线路径的东西运动，这个东西称为测地线。一根测地线是邻近两点之间最短（或最长）的路径。例如，地球的表面是个弯曲的二维空间。地球上的测地线称为大圆，是两点之间最近的路径（图2.8）。由于测地线是两个机场之间的最短程，这正是领航员叫飞行员飞行的航线。在广义相对论中，物体总是沿着四维时空的直线走。尽管如此，在我们看来它在三维空间中是沿着弯曲的路径。（这如同看一架在非常多山的地面上空飞行的飞机。虽然它沿着三维空间的直线飞，它在二维的地面上的影子却是沿着一条弯曲的路径。）

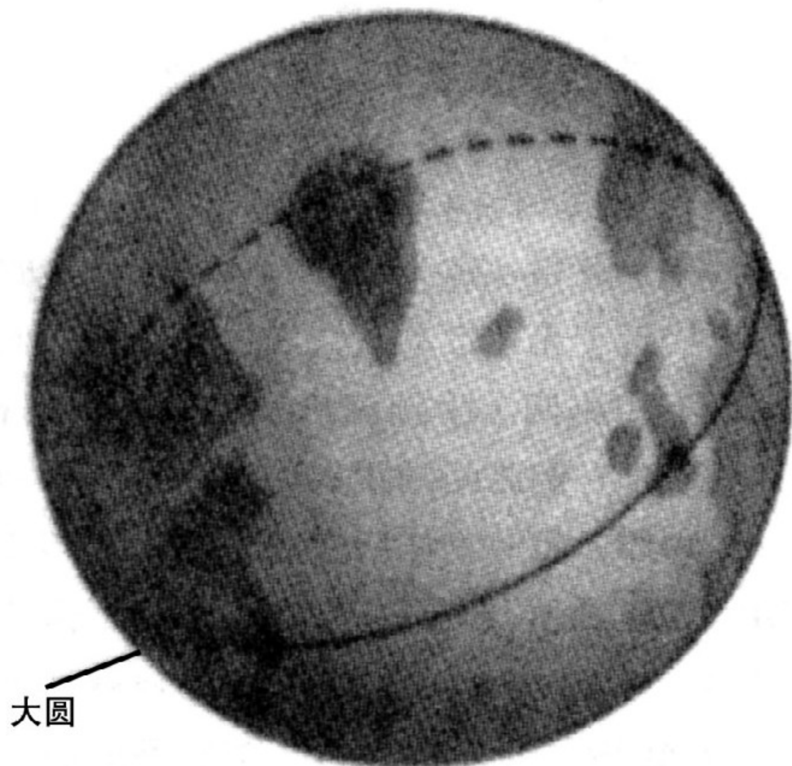


图2.8

太阳的质量以这样的方式弯曲时空，使得在四维的时空中地球虽然沿着直线的路径，它却让我们看起来是沿着三维空间中的一个圆周轨道运动。事实上，广义相对论和牛顿引力理论预言的行星轨道几乎完全一致。然而，对于水星，这颗离太阳最近，受到引力效应最强，轨道被拉得相当长的行星，广义相对论预言其轨道椭圆的长轴应围绕着太阳以大约每1万年1度的速率进动。尽管这个效应如此微小，但在1915年前即被注意到了，并被作为爱因斯坦理论的第一个验证。近年来，其他行星和牛顿理论预言的甚至更小的轨道偏差已被雷达测量到，并且发现和广义相对论的预言相符。

光线也必须在时空中遵循测地线。时空是弯曲的事实再次意味着，光线在空间中看起来不是沿着直线行进。这样，广义相对论预言光线必须被引力场折弯。譬如，理论预言，由于太阳的质量的缘故，太阳近处的点的光锥会向内稍微弯折。这表明，从遥远恒星发出的刚好通过太阳附近的光线会被偏折很小的角度，对于地球上的观察者而言，这恒星似

乎位于不同的位置（图2.9）。当然，如果从恒星来的光线总是在靠太阳很近的地方穿过，则我们就无从分辨，是光线被偏折了，还是该恒星实际上就在我们看到的地方。然而，由于地球围绕着太阳公转，不同的恒星显得从太阳后面通过，并且它们的光线受到偏折。所以，相对于其他恒星而言，它们改变了表观的位置。

在正常情况下，要观察到这个效应非常困难，这是由于太阳的光线使得人们不可能观看天空上出现在太阳附近的恒星。然而，在日食时就可能观察到，这时太阳的光线被月亮遮住了。由于第一次世界大战正在进行，爱因斯坦光偏折的预言不可能在1915年立即得到验证。直到1919年，一个英国的探险队从西非观测日食，证明光线确实像理论所预言的那样被太阳偏折。这次英国人证明德国人的理论被欢呼为战后两国和好的伟大行动。具有讽刺意味的是，后来人们检查这次探险所拍的照片，发现其误差和企图测量的效应同样大。他们的测量纯属运气，或是已知他们所要得的结果的情形，这在科学上时有发生。然而，后来的多次观测准确地证实了光偏折。

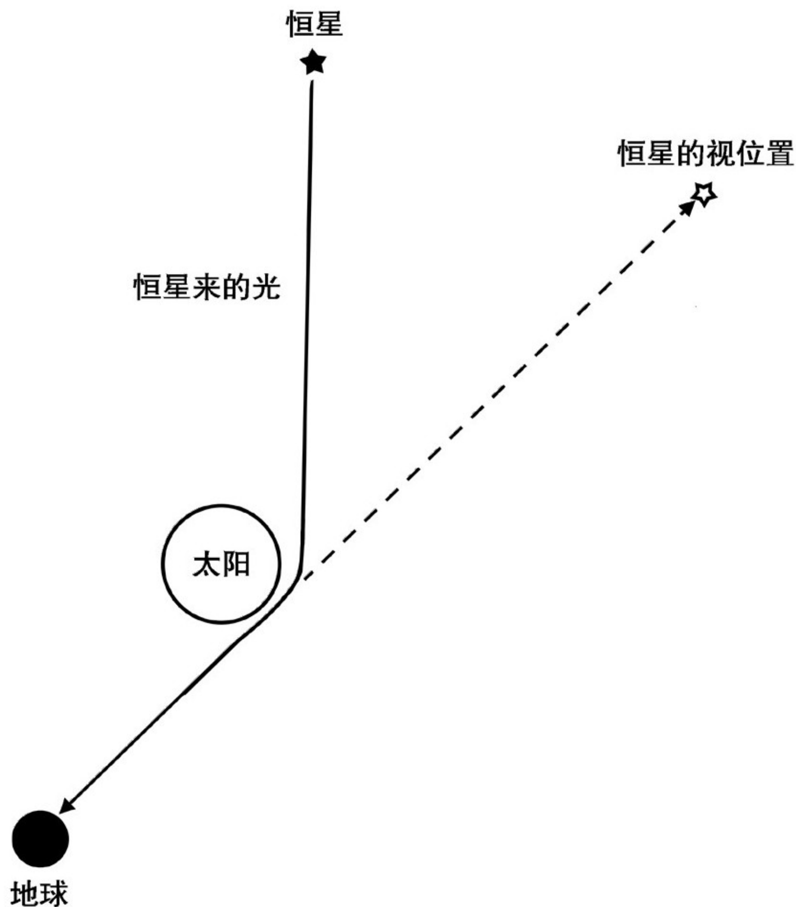


图2.9

广义相对论的另一个预言是，在像地球这样的大质量的物体附近，时间显得流逝得更慢一些。这是因为光能量和它的频率（光在每秒钟里波动的次数）有一种关系：能量越大，则频率越高。当光从地球的引力场往上行进，它失去能量，因而其频率下降（这表明两个相邻波峰之间的时间间隔变大）。在上面的某个人看来，下面发生的每一件事情都显得需要更长的时间。1962年，人们利用一对安装在水塔顶上和底下的非常准确的钟，验证了这个预言。发现底下的那只更接近地球的钟走得较慢，这和广义相对论正好相符。目前，随着基于卫星信号的非常精确的导航系统的出现，地球上的不同高度的钟的速度的差异，在实用上具有相当的重要性。如果人们无视广义相对论的预言，计算的位置会错几英里。

牛顿运动定律使在空间中的绝对位置的观念寿终正寝。而相对论摆脱了绝对时间。考虑一对双生子。假定其中一个孩子去山顶上生活，而另一个留在海平面，第一个将比第二个老得快些。这样，如果他们再次相会，一个会比另一个更老一些。在这个例子中，年纪的差别会非常小。但是，如果有一个孩子在以近于光速运动的航天飞船中作长途旅行，这种差别就会大得多。当他回来时，他会比留在地球上的另一个年轻得多。这叫做双生子佯谬，但是，只是对于头脑中仍有绝对时间观念的人而言，这才是佯谬。在相对论中并没有唯一的绝对时间，相反，每个人都有他自己的时间测度，这依赖于他在何处并如何运动。

1915年之前，空间和时间被认为是事件在其中发生的固定舞台，而它们不受在其中发生的事件的影响。即便在狭义相对论中，这也是对的。物体运动，力相互吸引并排斥，但时间和空间则完全不受影响地延伸着。空间和时间很自然地被认为无限地向前延伸。

然而在广义相对论中，情况则完全不同。这时，空间和时间变成为动力量：当物体运动，或者力作用时，它影响了空间和时间的曲率；反过来，时空的结构影响了物体运动和力作用的方式。空间和时间不仅去影响，而且被发生在宇宙中的每一件事影响。正如人们没有空间和时间的概念不能谈论宇宙的事件一样，同样地，在广义相对论中，在宇宙界限之外讲空间和时间也是没有意义的。

在以后的几十年中，对空间和时间的这种新理解是对我们宇宙观的变革。旧的宇宙观被新的宇宙观取代了。前者认为宇宙基本上是不变的，它可能已经存在了无限长的时间，并将永远继续存在下去；后者则认为宇宙在运动、在膨胀，它似乎开始于过去的某一个时间，并也许会在将来的某一个时间终结。这个变革正是下一章的内容。几年之后，它又是我研究理论物理的起点。罗杰·彭罗斯和我证明了，爱因斯坦广义相对论意味着，宇宙必须有个开端，并且可能有个终结。

第3章　膨胀的宇宙

如果在一个清澈无月的夜晚仰望星空，人们能看到的最亮的星体最可能是金星、火星、木星和土星这几颗行星，还有巨大数目的正像我们太阳但离我们远得多的恒星。事实上，随着地球围绕着太阳公转，某些固定的恒星相互之间的位置看起来确实有了非常微小的变化——它们不是完全固定不动的！这是因为它们距离我们较近一些。当地球围绕着太阳公转时，相对于更远处的恒星背景，我们从不同的位置观测它们。这是幸运的，因为它使我们能直接测量这些恒星离开我们的距离，它们离我们越近，就显得移动得越多。最近的恒星叫作比邻星，它离我们大约4光年那么远（从它发出的光大约花费4年才能到达地球），也就是大约23万亿英里的距离。其他大部分肉眼可见的恒星离开我们的距离均在几百光年之内。与之相比，太阳仅仅在8光分那么远！可见的恒星散布在整个夜空，但是特别集中在一条称为银河的带上。远在公元1750年，有些天文学家就提出，如果大部分可见的恒星处在一个单独的碟状的结构中，则银河的外观可以得到解释。这个结构便是今天我们称为螺旋星系的一个例子。之后不过几十年，天文学家威廉·赫歇尔爵士通过对大量恒星的位置和距离进行仔细的编目分类，就证实了这个观念。即便如此，这个思想在20世纪初才完全被人们接受。

1924年，我们现代的宇宙图象才被奠定。那一年，美国天文学家埃德温·哈勃证明了，我们的星系不是唯一的星系。事实上，还存在其他许多星系，在它们之间是巨大的空虚的太空。为了证明这些，他必须确定这些星系的距离。这些星系是如此之遥远，不像邻近的恒星那样，它们确实显得是固定不动的。所以哈勃被迫用间接的手段去测量这些距离。由于恒星的视亮度取决于两个因素：它辐射出来多少光（它的光度）以及它离我们多远。对于近处的恒星，我们可以测量其视亮度和距离，这样我们可以算出它的光度。相反，如果我们知道其他星系中恒星的光度，我们可用测量它们的视亮度来算出它们的距离。哈勃注意到，当某些类型的恒星近到足以被我们测量时，它们有相同的光度；所以他提出，如果我们在其他星系找出这样的恒星，我们可以假定它们有同样的光度——这样就可计算出那个星系的距离。如果我们能对同一星系中的许多恒星这样做，并且计算结果总是给出相同的距离，则我们就会相当地信赖自己的估计。

埃德温·哈勃用上述方法算出了9个不同星系的距离。现在我们知道，我们的星系只是用现代望远镜可以看到的几千亿个星系中的一个，每个星系本身都包含有几千亿颗恒星。图3.1所示的便是一个螺旋星系的图，从生活在其他星系中的人来看我们的星系，想必也类似这个样子。我们生活在一个宽约为10万光年并慢慢旋转着的星系中；在它的螺旋臂上的恒星围绕着它的中心公转一圈大约花费几亿年。我们的太阳只不过是一颗平常的、平均大小的、黄色的恒星，它位于一个螺旋臂的内边缘附近。我们离开亚里士多德和托勒密的观念肯定相当远了，那时人们认为地球是宇宙的中心！

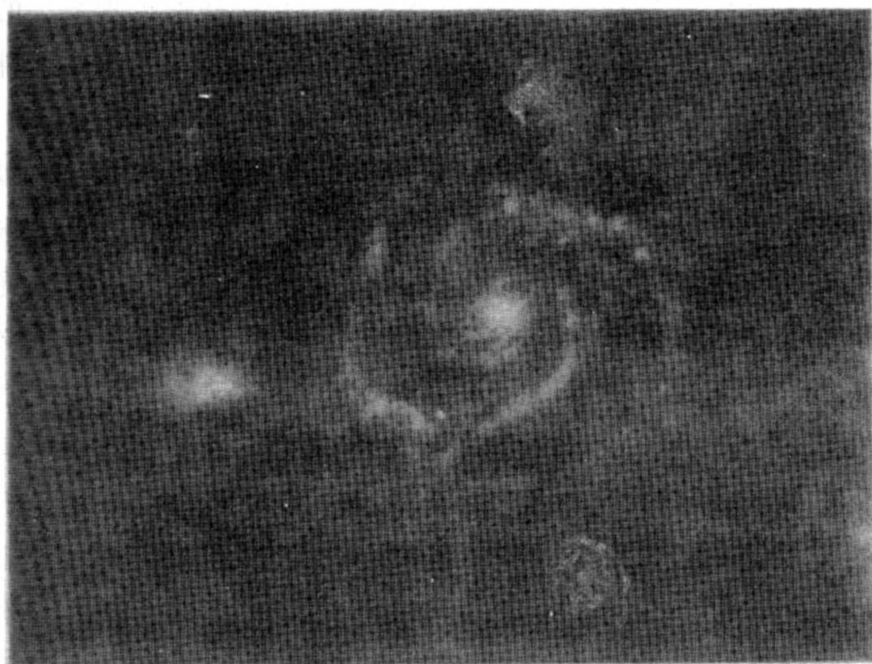


图3.1

恒星离开我们是如此之遥远，使我们只能看到极小的光点，而看不到它们的大小和形状。这样怎么能区分不同的恒星种类呢？对于绝大多数的恒星而言，只有一个特征可供观测——光的颜色。牛顿发现，如果太阳光通过一个称为棱镜的三角形状的玻璃块，就会被分解成像在彩虹中一样的分颜色（它的光谱）。将一台望远镜聚焦在一个单独的恒星或星系上，人们就可类似地观察到从这恒星或星系来的光谱。不同的恒星具有不同的光谱，但是不同颜色的相对亮度总是和人们期望从一个红热的物体发出的光的光谱完全一致。（实际上，从任何不透明的灼热的物

体发出的光，有一个只依赖于它的温度的特征光谱——热谱。这意味着可以从恒星的光谱得知它的温度。）此外，我们发现，某些非常特定的颜色在恒星光谱里丢失，这些失去的颜色可依不同的恒星而异。由于我们知道，每一化学元素吸收非常独特的颜色族系，将它们和恒星光谱中失去的颜色相比较，我们就可以准确地确定恒星大气中存在哪种元素。

在20世纪20年代，当天文学家开始观察其他星系中的恒星光谱时，他们发现了某些最奇异的现象：它们和我们的银河系一样具有吸收的特征线族，只是所有这些线族都向光谱的红端移动了同样的相对量。为了理解其含意，我们必须首先理解多普勒效应。正如我们已经看到的，可见光由电磁场的起伏或波动构成。光的波长（或者相邻波峰之间的距离）极其微小，约为0.0000004至0.0000008米。光的不同波长正是人眼看成不同颜色的东西，最长的波长出现在光谱的红端，而最短的波长在光谱的蓝端。现在想象在离开我们固定的距离处有一个光源——例如一颗恒星——以固定的波长发出光波。显然，我们接收到的波长和发射时的波长一样（星系的引力场没有强到足以对它产生明显的效应）。现在假定这恒星光源开始向我们运动。当光源发出第二个波峰时，它离开我们较近一些，这样两个波峰之间的距离比恒星静止时较小。这意味着，我们接收到的波的波长比恒星静止时较短。相应地，如果光源离开我们运动，我们接收的波的波长将较长。这意味着，当恒星离开我们而去时，它们的光谱向红端移动（红移），而当恒星趋近我们而来时，光谱则被蓝移。这个称作多普勒效应的频率和速度的关系是我们日常熟悉的。例如听一辆小汽车在路上驶过：当它趋近时，它的发动机的音调变高（对应于声波的短波长和高频率）；当它经过我们身边而离开时，它的音调变低。光波或射电波的行为与之类似。警察就是利用多普勒效应的原理，靠测量射电波脉冲从车上反射回来的波长来测定车速。

在哈勃证明了其他星系存在之后的几年里，他花时间为它们的距离编目以及观察它们的光谱。那时候大部分人都以为，这些星系完全随机运动，所以预料会发现和红移光谱一样多的蓝移光谱。因此，当他发现大部分星系是红移的：几乎所有都远离我们而去时，确实令人十分惊异！1929年哈勃发表的结果更令人惊异：甚至星系红移的大小也不是随机的，而是和星系离开我们的距离成正比。或换句话讲，星系越远，它离开我们运动得越快！这表明宇宙不能像人们原先所想象的那样处于静态，而实际上是在膨胀；不同星系之间的距离一直在增加。

宇宙膨胀的发现是20世纪最伟大的智力革命之一。事后想起来，何以过去从来没有人想到这一点？！牛顿或其他人早就应该意识到，静态的宇宙在引力的影响下会很快开始收缩。然而现在假定宇宙正在膨胀，如果它膨胀得相当慢，引力就会使之最终停止膨胀，然后开始收缩。但是，如果它以比某一临界率更大的速度膨胀，引力则永远不足够强到使它停止膨胀，宇宙就永远继续膨胀下去。这有点像当一个人在地球表面引燃火箭上天时发生的情形，如果火箭的速度相当小，引力将最终使火箭停止并折回地面；另一方面，如果火箭具有比某一临界值（大约每秒7英里）更大的速度，引力的强度就不足以将其拉回，这样它将继续永远飞离地球。19世纪、18世纪甚至17世纪晚期的任何时候，人们都可以从牛顿的引力论预言出宇宙的这个行为。然而，静态宇宙的信念是如此之强，以至于一直维持到了20世纪的早期。甚至爱因斯坦于1915年发表其广义相对论时，还是这么肯定宇宙必须是静态的，以至于他在其方程中引进一个所谓的宇宙常数来修正自己的理论，使静态的宇宙成为可能。爱因斯坦引入一个新的“反引力”，这力不像其他力那样，不由任何特别的源引起，而恰恰是时空结构固有的。他宣称，时空有一内在的膨胀的趋向，这可以用来刚好去平衡宇宙间所有物质的相互吸引，由此导致一个静态的宇宙。当爱因斯坦和其他物理学家正在想方设法避免广义相对论的非静态宇宙的预言时，看来只有一个人，即俄国物理学家和数学家亚历山大·弗里德曼愿意只用广义相对论着手解释它。

弗里德曼对于宇宙作了两个非常简单的假定：我们不论往哪个方向看，也不论在任何地方进行观察，宇宙看起来都是一样的。弗里德曼指出，仅仅从这两个观念出发，我们就应该预料宇宙不是静态的。事实上，弗里德曼在1922年所做的预言，正是几年之后埃德温·哈勃观察到的结果。

很清楚，关于宇宙在任何方向上都显得一样的假设，实际上是不对的。例如，正如我们看到的，我们星系中的其他恒星形成了横贯夜空的叫作银河系的光带。但是如果看得更远，星系数目则或多或少显得是相同的。所以假定我们在比星系间距离更大的尺度下来观察，而不管在小尺度下的差异，则宇宙确实在所有的方向看起来是大致一样的。在很长的时间里，这为弗里德曼的假设——作为实际宇宙的粗糙近似提供了充分的理由。但是，近世纪出现的一桩幸运事件揭示了以下事实，弗里德曼假设实际上异常准确地描述了我们的宇宙。

1965年，美国新泽西州贝尔电话实验室的两位美国物理学家阿诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊正在检测一个非常灵敏的微波探测器。（微波正如光波，但是它的波长大约为1厘米。）他们的探测器收到了比预想的还要大的噪声。彭齐亚斯和威尔逊为此而忧虑，这噪声不像是从任何特别的方向来的。首先他们在探测器上发现了鸟粪并检查了其他可能的故障，但很快就排除了这些可能性。他们知道，当探测器倾斜地指向天空时，从大气层里来的任何噪声都应该比原先垂直指向时更强，因为从接近地平线方向接收比起直接从头顶方向接收，光线要穿过多得多的大气。然而，不管探测器朝什么方向，这额外的噪声都是一样的，所以它一定是从大气层以外来的。并且，它在白天、夜晚、整年都是一样，尽管地球围绕着自己的轴自转或围绕太阳公转。这表明，这辐射必须来自太阳系以外，甚至星系之外，否则，当地球的运动使探测器指向不同方向时，噪声就会变化。

事实上，我们知道这辐射必须穿过我们可观察到的宇宙的大部分才行进至此，并且由于它在不同方向上都一样，如果只在大尺度下，这宇宙也必须是各向同性的。现在我们知道，不管我们朝什么方向看，这噪声的变化总是非常微小：这样，彭齐亚斯和威尔逊无意中非常精确地证实了弗里德曼的第一个假设。然而，由于宇宙并非在每一个方向上，而是在大尺度的平均上完全相同，所以微波也不可能在每一个方向上完全相同。在不同的方向之间必须有一些小变化。1992年宇宙背景探险者，或称为COBE，首次把它们检测到，其幅度大约为十万分之一。尽管这些变化很小，但是正如我们将在第8章解释的，它们非常重要。

大约与彭齐亚斯和威尔逊在研究探测器中的噪声的同时，在附近的普林斯顿大学的两位美国物理学家，罗伯特·狄克和詹姆斯·皮帕尔斯也对微波感兴趣。他们正在研究乔治·伽莫夫（曾为亚历山大·弗里德曼的学生）的一个见解：早期的宇宙一定是非常密集的白热的。狄克和皮帕尔斯认为，我们应该仍然能看到早期宇宙的白热，这是因为从它的非常远的部分来的光，刚好现在才到达我们这里。然而，宇宙的膨胀把光红移得如此厉害，现在只能作为微波辐射被我们观察到。正当狄克和皮帕尔斯准备寻找这辐射时，彭齐亚斯和威尔逊听到了他们的工作，并且意识到，他们自己已经找到了它。为此，彭齐亚斯和威尔逊被授予1978年的诺贝尔奖（狄克和皮帕尔斯看来有点难过，更别提伽莫夫了）。

现在初看起来，关于宇宙在任何方向看起来都一样的，所有证据似

乎暗示，我们在宇宙中的位置有点特殊。特别是，如果我们看到所有其他的星系都远离我们而去，那似乎我们必须在宇宙的中心。然而，还存在另外的解释：从任何其他星系上看宇宙，在任何方向上也都一样。正如我们已经看到的，这是弗里德曼的第二个假设。我们没有任何科学的证据去相信或反驳这个假设。我们之所以相信它只是基于谦虚：因为如果宇宙只在围绕我们的所有方向显得相同，而在围绕宇宙的其他点却并非如此，则是非常令人惊奇的！在弗里德曼模型中，所有的星系都相互直接离开。这种情形很像一个画上好多斑点的气球被逐渐吹胀。当气球膨胀时，任何两个斑点之间的距离加大，但是没有一个斑点可认为是膨胀的中心。此外，斑点相离得越远，则它们相互离开得越快。类似地，在弗里德曼的模型中，任何两个星系相互离开的速度和它们之间的距离成正比。所以人们预言，星系的红移应与离开我们的距离成正比，这正是哈勃发现的。尽管他的模型取得了成功并预言了哈勃的观测，但是直到1935年，为了响应哈勃的宇宙均匀膨胀的发现，美国物理学家霍瓦德·罗伯逊和英国数学家阿瑟·瓦尔克发现了类似的模型后，弗里德曼的工作才在西方被普遍知道。

虽然弗里德曼只找到一个模型，其实满足他的两个基本假设的共有三类模型。在第一类模型（即弗里德曼找到的）中，宇宙膨胀得足够慢，这样不同星系之间的引力使膨胀减缓，并最终停止。然后星系开始相互靠近，而宇宙收缩。图3.2表示随着时间增加，两个邻近星系之间距离变化。刚开始时距离为零，接着它增长到最大值，然后又减小到零；在第二类解中，宇宙膨胀得如此之快，引力虽然能使之缓慢一些，却永远不能使之停止。图3.3展示在此模型中的邻近星系之间的距离。刚开始时距离为零，最后星系以稳恒的速度相互离开；最后，还有第三类解，宇宙的膨胀快到足以刚好避免坍缩。正如图3.4所示，星系的距离也从零开始，然后永远增大。然而，虽然星系分开的速度永远不会完全变为零，但是却会越变越小。

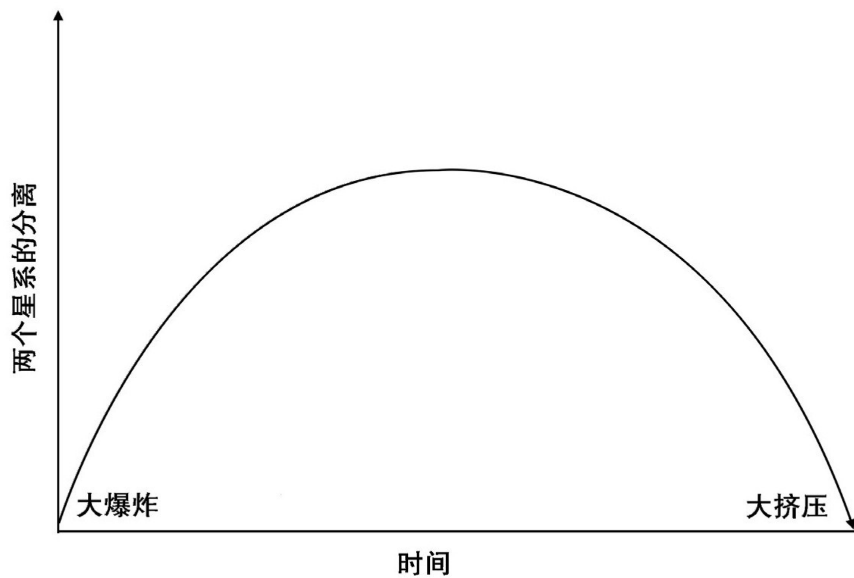


图3.2

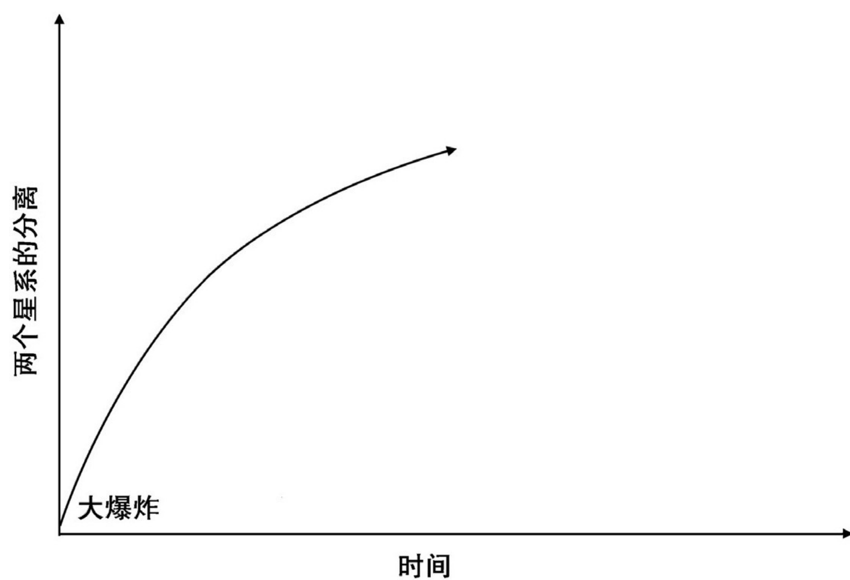


图3.3

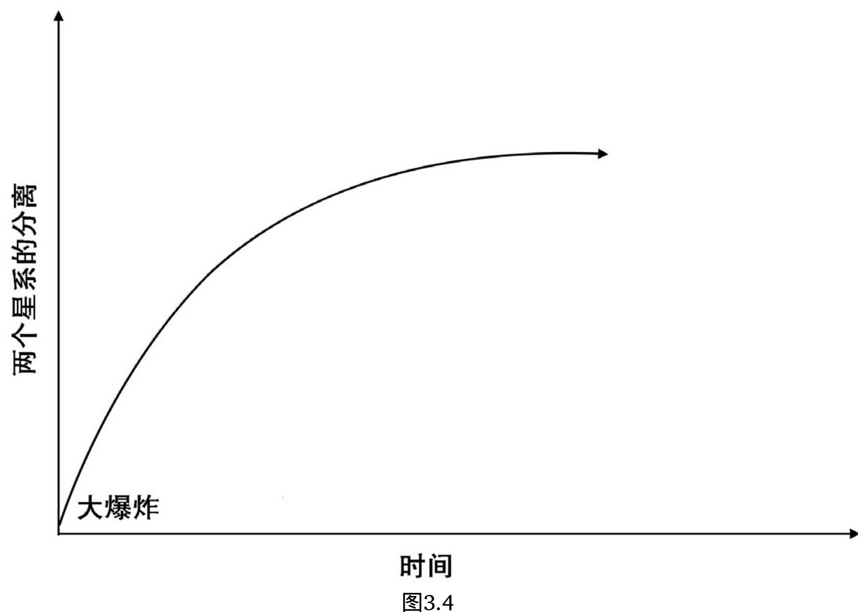


图3.4

第一类弗里德曼模型的奇异特点是，宇宙在空间上不是无限的，但却没有边界。引力如此强大，将空间折弯使之再绕回到自身，这样就和地球的表面相当类似。如果有人在地球的表面上沿着一定的方向不停地旅行，他将永远不会遇到一个不可超越的障碍或从边缘掉下去，反而最终会回到他出发的那一点。第一类弗里德曼模型中的空间与此非常相像，只不过地球表面是二维的，而它是三维的罢了。第四维时间在范围上也是有限的，然而它像一根有两个端点或边界即开端和终端的线。以后我们会看到，当人们将广义相对论和量子力学的不确定性原理结合在一起时，就可能使空间和时间都成为有限的，而没有任何边缘或边界。

一个人可以绕宇宙一周最终回到出发点的思想是科学幻想的好题材，但它在实际上并没有多大意义。因为可以证明，一个人还没来得及绕回一圈，宇宙已经坍缩到了零尺度。你必须旅行得比光还快，才能在宇宙终结之前绕回到你的出发点——而这是不允许的！

在第一类弗里德曼模型中，宇宙膨胀后又坍缩，空间如同地球表面那样，弯曲后又折回到自身。在第二类永远膨胀的模型中，空间以另外的方式弯曲，如同一个马鞍面。所以，在这种情形下，空间是无限的。最后，在第三类刚好以临界速率膨胀的弗里德曼模型中，空间是平坦的（而因此也是无限的）。

但是究竟以何种弗里德曼模型描述我们的宇宙呢？宇宙最终会停止膨胀并开始收缩，还是将永远膨胀下去呢？要回答这个问题，我们必须知道现在的宇宙膨胀速度和它现在的平均密度。如果密度比一个由膨胀率决定的临界值还小，则引力太弱不足以将膨胀停止；如果密度比这临界值大，则引力会在未来的某一时刻将膨胀停止并使宇宙坍缩。

利用多普勒效应，可由测量星系离开我们的速度来确定现在的膨胀速度。这可以非常精确地实现。然而，因为我们只能间接地测量星系的距离，所以对它们的距离知道得不很清楚。我们知道的不过是，宇宙在每10亿年里膨胀5%～10%。然而，我们对现在宇宙的平均密度测量得更不准确。我们如果将银河系和其他星系的所有能看到恒星的质量加起来，甚至按对膨胀率的最低的估值而言，其质量总量还不到用以阻止膨胀的临界值的1%。然而，在我们以及其他星系里应该包含大量的“暗物质”，那是我们不能直接看到的，但由于它的引力对星系中恒星轨道的影响，我们知道它必定存在。此外人们发现，大多数星系是成团的。我们能类似地推断，由其对星系运动的效应，在这些成团的星系之间还存在更多的暗物质。将所有这些暗物质加在一起，我们仍只能获得为停止膨胀必需的密度的1/10左右。然而，我们不能排除这样的可能性，可能还有我们尚未探测到的其他的物质形式，它们几乎均匀地分布于整个宇宙中，它仍可能使得宇宙的平均密度达到停止膨胀所必需的临界值。所以，现在的证据暗示，宇宙可能会永远地膨胀下去。但是，所有我们能真正肯定的是，既然它已经至少膨胀了100亿年，即便宇宙将要坍缩，至少要再过这么久才有可能。这不应使我们过度忧虑——到那时候，除非我们已到太阳系以外开拓了殖民地，否则人类早就随着太阳的消灭而死亡殆尽！

所有的弗里德曼解都具有一个特点，即在过去的某一时刻（约100亿年至200亿年之前）邻近星系之间的距离一定为零。在这被我们称为大爆炸的那一时刻，宇宙的密度和时空曲率都是无限大的。因为数学不能真正地处理无限大的数，这意味着，广义相对论（弗里德曼以此为基础）预言，在宇宙中存在一点，在该处理论本身崩溃。这样的点正是数学中称为奇点的一个例子。事实上，我们所有的科学理论都是基于时空是光滑的和几乎平坦的基础上表述的，所以它们在时空曲率为无限大的大爆炸奇点处崩溃。这意味着，即使在大爆炸前存在事件，人们也不能用它们去确定其后所要发生的事件，因为可预见性在大爆炸处崩溃了。

相应地，如果，事实也正是如此，我们只知道在大爆炸后发生的事件，我们就不能确定在这之前发生什么。就我们而言，发生于大爆炸之前的事件不能有后果，所以并不构成我们宇宙的科学模型的一部分。因此，我们应将它们从模型中割除掉，并宣称时间是从大爆炸开始的。

很多人不喜欢时间有个开端的观念，可能是因为它略带有神的干涉的味道。（另一方面，天主教会抓住了大爆炸模型，并在1951年正式宣告，它和《圣经》相和谐。）因此，人们多次企图避免曾经存在过大爆炸的这一结论。所谓的稳态理论得到过最广泛的支持。这是由纳粹占领的奥地利来的两个难民——赫曼·邦迪和托马斯·高尔德，以及一个在战时和他们一道从事雷达研制的英国人，弗雷德·霍伊尔于1948年共同提出的。其想法是，当星系相互离开时，由正在连续产生的新物质在它们中的间隙不断地形成新的星系。因此，在空间的所有点以及在所有的时间，宇宙看起来在大致上是相同的。稳态理论需要对广义相对论进行修正，使之允许物质的连续生成，但是有关的产生率是如此之低（大约每年每立方千米一个粒子），低到不与实验相冲突。在第1章叙述的意义上，这是一个好的科学理论：它非常简单，并做出确定的预言可让观察者检验。其中一个预言是，我们无论在宇宙的何时何地看给定的空间体积内星系或类似物体的数目必须一样。20世纪50年代晚期和60年代早期，由马丁·赖尔（他在战时也和邦迪、高尔德以及霍伊尔共事，作雷达研究）领导的一个天文学家小组在剑桥对从外空间来的射电源进行了普查。这个剑桥小组指出，这些射电源的大多数必须位于我们星系之外（它们中的许多确实可被认证与其他星系相关），并且存在的弱源比强源多得多。他们将弱源解释为较远的源，强源为较近的源。结果发现，单位空间体积内普通的源似乎在近处比远处稀少。这可能表明，我们处于宇宙的一个巨大区域的中心，这里的源比其他地方稀少。另外的一个解释是，宇宙在射电波向我们出发的过去的那一时刻具有比现在更密集的源。任何一种解释都和稳态理论相矛盾。此外，1965年彭齐亚斯和威尔逊的微波背景辐射的发现还指出，宇宙在过去必定密集得多。因此必须抛弃稳态理论。

1963年，两位苏联科学家欧格尼·利弗席兹和艾萨克·哈拉尼可夫做了另外的尝试，设法避免存在大爆炸并因此引起时间起点的问题。他们提出，大爆炸可能只是弗里德曼模型的特性，这个模型毕竟只是真实宇宙的近似。也许，在所有大体类似实在宇宙的模型中，只有弗里德曼模型包含大爆炸奇点。在弗里德曼模型中，所有星系都直接相互离开——

所以一点都不奇怪，在过去的某一时刻它们必须在同一处。然而，在实际的宇宙中，星系不仅仅直接相互离开——它们还有一些斜向速度。所以，实际上它们从来没必要恰好在同一处，只不过非常靠近而已。也许，现在膨胀着的宇宙不是来自于大爆炸奇点，而是来自于更早期的收缩相；当宇宙坍缩时，其中的粒子可以不都碰撞，而是相互离得很近飞过然后又离开，产生了现在的宇宙膨胀。那么何以得知这实际的宇宙是否从大爆炸起始的呢？利弗席兹和哈拉尼可夫所做的，是去研究大体和弗里德曼模型相像的宇宙模型，但是考虑了实际宇宙中的星系的不规则性和杂乱速度。他们指出，即使星系不再总是直接相互离开，这样的模型也可以从一个大爆炸开始。但是他们宣称，这只在某些例外的模型中仍然可能发生，那里所有星系都以正确的方式运动。他们论证道，似乎没有大爆炸奇点的类弗里德曼模型比有此奇点的模型多无限多倍，所以我们的结论应该是，在实际上并没有过大爆炸。然而，他们后来意识到，存在更为广泛的具有奇点的类弗里德曼模型，那里的星系不必以任何特别的方式运动。所以，他们在1970年撤回了自己的主张。

利弗席兹和哈拉尼科夫的工作是有价值的。因为它显示了，如果广义相对论是正确的，宇宙可以有过奇点，一个大爆炸。然而，它没有解决关键的问题：广义相对论是否预言我们的宇宙一定有过大爆炸或时间的开端？对于这个问题，英国数学家兼物理学家罗杰·彭罗斯在1965年以完全不同的手段给出了回答。利用广义相对论中光锥行为的方式以及引力总是吸引这个事实，他证明了，坍缩的恒星在自己的引力作用下陷入到一个区域之中，其表面最终缩小到零。并且由于这区域的表面缩小到零，它的体积也应如此。恒星中的所有物质将被压缩到一个零体积的区域里，所以物质的密度和时空的曲率变成无限大。换言之，人们得到了一个奇点，它被包含在一个叫作黑洞的时空区域中。

彭罗斯的结果乍看起来只适用于恒星，它并没有涉及任何关于整个宇宙的过去是否有过大爆炸奇点的问题。然而，当彭罗斯在创作他的定理之时，我还是一名研究生，正在尽力寻求一个完成博士论文的问题。两年之前我即被诊断得了肌萎缩性（脊椎）侧索硬化症，通常又称为卢伽雷病或运动神经细胞病，并且得知只有一两年可活了。在这种情况下，看来没有很多必要攻读博士学位了——我预料不能活那么久。然而两年过去了，我没有糟糕到那种程度。事实上，我的事情还进行得相当好，还和一个非常好的姑娘简·瓦尔德订婚了。但是为了结婚，我需要一份工作；为了得到工作，我需要一个博士学位。

1965年，我读到彭罗斯关于任何物体受到引力坍缩必定最终形成一个奇点的定理。我很快意识到，如果人们将彭罗斯定理中的时间方向颠倒以使坍缩变成膨胀，假定现在宇宙在大尺度上大体类似弗里德曼模型，这定理的条件仍然成立。彭罗斯定理已经指出，任何坍缩必定终结于一个奇点；其时间颠倒的论证则是，任何类弗里德曼膨胀宇宙一定是从一个奇点开始。为了技巧上的原因，彭罗斯定理需要宇宙在空间上是无限的条件。于是，在实质上，我能用它来证明，只有当宇宙膨胀得快到足以避免重新坍缩时（因为只有那些弗里德曼模型才是空间无限的），才一定存在一个奇点。

在随后的几年中，我发展了新的数学技巧，从用于证明奇点一定发生的定理中除去了这个和其他技术上的条件。最后的结果是1970年彭罗斯和我的合作论文。那篇论文最后证明了，假定广义相对论是正确的，而且宇宙包含着我们观测到的这么多物质，则过去一定有过一个大爆炸奇点。我们的工作遭遇到许多的反对，部分来自苏联人，由于他们对马克思主义科学决定论的信仰；另一部分来自某些人，他们认为整个奇点的观念是不一致的，并糟蹋了爱因斯坦理论的完美。然而，人实在不能辩赢数学定理。所以我们的工作最终被广泛接受，现在几乎每个人都假定宇宙是从一个大爆炸奇点起始的。颇具讽刺意味的是，现在我改变了想法，试图去说服其他物理学家，事实上在宇宙的开端并没有奇点——正如我们将要看到的，一旦考虑了量子效应，奇点就会消失。

我们在这一章已经看到，在不到半个世纪的时间里，人们几千年来形成的宇宙观被转变了。哈勃关于宇宙膨胀的发现，以及关于我们自己的行星在茫茫宇宙中微不足道的认识，只不过是起点而已。随着实验和理论证据的积累，人们越来越清楚地认识到，宇宙在时间上必须有个开端。直到1970年，在爱因斯坦广义相对论的基础上，彭罗斯和我才证明了它。这个证明显示，广义相对论只是一个不完全的理论，它不能告诉我们宇宙是如何开始的，因为它预言，所有包括它自己在内的物理理论都在宇宙的开端失效。然而，广义相对论宣称自己只是一个部分理论，所以奇点定理真正显示的是，在极早期宇宙中一定有过一个时刻，那时宇宙是如此之小，人们不能再不理会20世纪另一个伟大的部分理论——量子力学的小尺度效应。20世纪70年代初期，我们被迫从极其巨大范围的理论理解宇宙转变到从极其微小范围的理论理解宇宙。在我们努力将这两个部分理论结合成一个单一的量子引力理论之前，下面首先描述量子力学这个理论。

第4章　不确定性原理

科学理论，尤其是牛顿引力论的成功，使得法国科学家拉普拉斯侯爵在19世纪初论断，宇宙是完全决定论的。拉普拉斯提出，应该存在一族科学定律，只要我们知道宇宙在某一时刻的完全的状态，我们便能预言宇宙中将会发生的任一事件。例如，假定我们知道某一个时刻的太阳和行星的位置和速度，则可用牛顿定律计算出在任何其他时刻的太阳系的状态。这种情形下的决定论是显而易见的，但拉普拉斯走得更远，他假定存在着某些类似定律，它们制约其他所有事物，包括人类的行为。

很多人强烈地抵制这种科学决定论的教义，他们感到这侵犯了上帝干涉世界的自由。但直到20世纪初，这种观念仍被认为是科学的标准假定。这种信念必须被抛弃的一个最初的征兆，是由英国科学家瑞利勋爵士和詹姆斯·金斯爵士做的计算。他们指出一个热的物体——例如恒星——必须以无限大的速率辐射出能量。按照当时人们相信的定律，一个热体必须在所有的频率同等地发出电磁波（诸如射电波、可见光或X射线）。例如，一个热体在每秒1万亿次波动至2万亿次波动频率之间的波发出和在每秒2万亿次波动至3万亿次波动频率之间的波同样的能量。而既然每秒波动数是无限的，这意味着辐射出的总能量也必须是无限的。

为了避免这显然荒谬的结果，德国科学家马克斯·普朗克在1900年提出，光波、X射线和其他波不能以任意的速率辐射，而只能以某种称为量子的波包发射。此外，每个量子具有确定的能量，波的频率越高，其能量越大。这样，在足够高的频率下，辐射单个量子所需要的能量比所能得到的还要多。因此，在高频下的辐射减少了，这样物体丧失能量的速率就变成有限的了。

量子假设可以非常成功地解释所观测到的热体的辐射发射率，但直到1926年另一位德国科学家沃纳·海森伯提出著名的不确定性原理之后，人们才意识到它对决定性论的含义。为了预言一个粒子未来的位置和速度，人们必须能够准确地测量它现在的位置和速度。显而易见的办法是将光照到这粒子上。一部分光波被此粒子散射开来，由此指明它的位置。然而，人们不可能将粒子的位置确定到比光的两个波峰之间距离更小的程度，所以为了精确测量粒子的位置，必须用短波长的光。可是，

由普朗克的量子假设，人们不能用任意小量的光；人们至少要用一个光量子。这量子会扰动这粒子，并以一种不能预见的方式改变粒子的速度。此外，位置测量得越准确，所需的波长就越短，单个量子的能量就越大，这样粒子的速度就被扰动得越厉害。换言之，你对粒子的位置测量得越准确，你对速度的测量就越不准确，反之亦然。海森伯指出，粒子位置的不确定性乘以粒子质量再乘以速度的不确定性不能小于一个确定量，该确定量称为普朗克常量。并且，这个极限既不依赖于测量粒子位置和速度的方法，也不依赖于粒子的种类。海森伯不确定性原理是世界的一个基本的不可回避的性质。

不确定性原理对我们的世界观有非常深远的影响。甚至到了70多年之后，许多哲学家还不能充分鉴赏它，它仍然是许多争议的主题。不确定性原理使拉普拉斯的科学理论，即一个完全决定性论的宇宙模型的梦想寿终正寝：如果人们甚至不能准确地测量宇宙现在的状态，那么就肯定不能准确地预言将来的事件！我们仍然可以想象，对于一些超自然的生物，存在一族完全地决定事件的定律，这些生物能够不干扰宇宙地观测宇宙现在的状态。然而，对于我们这些芸芸众生而言，这样的宇宙模型并没有太多的兴趣。看来，最好是采用称为奥铿剃刀的经济原理，将理论中不能被观测到的所有特征都割除掉。20世纪20年代，在不确定性原理的基础上，海森伯、埃尔温·薛定谔和保罗·狄拉克运用这种手段将力学重新表述成称为量子力学的新理论。在此理论中，粒子不再分别有很好定义的而又不能被观测的位置和速度。取而代之，粒子具有位置和速度的一个结合物，量子态。

一般而言，量子力学并不对一次观测预言一个单独的确定结果。取而代之，它预言一组可能发生的不同结果，并告诉我们每个结果出现的概率。也就是说，如果我们对大量类似的系统作同样的测量，每一个系统以同样的方式起始，我们将会找到测量的结果为A出现一定的次数，为B出现另一不同的次数，等等。人们可以预言结果为A或B的出现的次数的近似值，但不能对个别测量的特定结果作出预言。因而量子力学把非预见性或随机性的不可避免因素引进了科学。尽管爱因斯坦在发展这些观念时起了很大作用，但他非常强烈地反对这些。他之所以得到诺贝尔奖就是因为他对量子理论的贡献。即使这样，他也从不接受宇宙受机缘控制的观点；他的情绪可以用他著名的断言来表达：“上帝不掷骰子。”然而，其他大多数科学家愿意接受量子力学，因为它和实验符合得很完美。它的的确确成为一个极其成功的理论，并成为几乎所有现代科

学技术的基础。它制约着晶体管和集成电路的行为，而这些正是电子设备诸如电视、计算机的基本元件。它还是现代化学和生物学的基础。物理科学未让量子力学适当结合进去的仅有领域是引力和宇宙的大尺度结构。

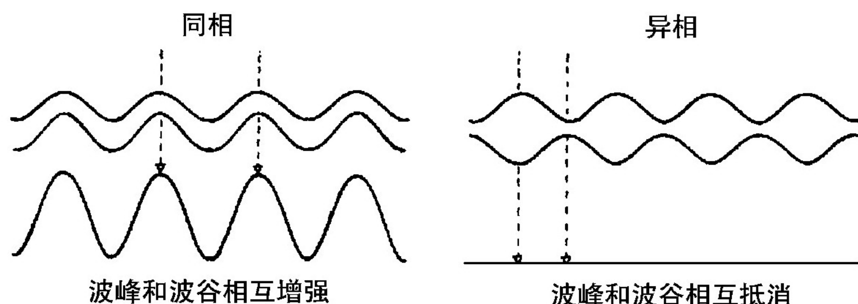


图4.1

虽然光是由波组成的，普朗克的量子假设告诉我们，在某些方面，它的行为似乎显现出它是由粒子组成的——它只能以波包或量子的形式发射或吸收。同样地，海森伯的不确定性原理意味着，粒子在某些方面的行为像波一样：它们没有确定的位置，而是被“抹平”成一定的概率分布。量子力学的理论是基于一个全新的数学基础之上，不再按照粒子和波来描述实际的世界；而只不过利用这些术语，来描述对世界的观测而已。这样，在量子力学中存在着波和粒子的二重性：为了某些目的将粒子考虑成波是有用的，而为了其他目的最好将波考虑成粒子。这导致一个很重要的结果，人们可以观察到两束波或粒子之间的所谓的干涉。那也就是，一束波的波峰可以和另一束波的波谷相重合。这两束波就相互抵消，而不像人们预料的那样，叠加在一起形成更强的波（图4.1）。一个光干涉的熟知例子是，肥皂泡上经常能看到颜色。这是因为从形成泡的很薄的水膜的两边的光反射引起的。白光由所有不同波长或颜色的光波组成，在从水膜一边反射回来的具有一定波长的波的波峰和从另一边反射的波谷相重合时，对应于此波长的颜色就不在反射光中出现，所以反射光就显得五彩缤纷。

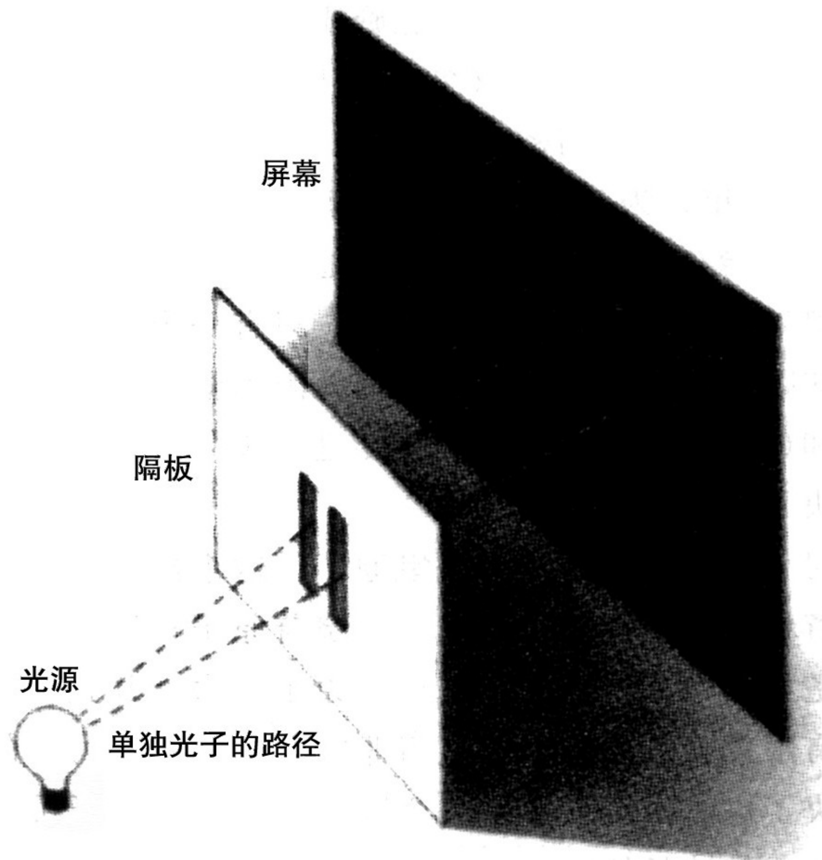


图4.2

由于量子力学引进的二重性，粒子也会产生干涉。所谓的双缝实验即是著名的例子（图4.2）。考虑一个带有两个平行狭缝的隔板，在它的一边放上一个特定颜色（即特定波长）的光源。大部分光都射在隔板上，但是一小部分光通过这两条缝。现在假定将一个屏幕放到隔板的另一边。屏幕上的任何一点都能接收到两个缝来的波。然而，一般来说，光从光源通过这两条狭缝传到屏幕上的距离是不同的。这表明，从狭缝来的光到达屏幕之时不再是相互同相的：有些地方波相互抵消，其他地方它们相互加强，结果形成有亮暗条纹的特征花样。

非常令人惊异的是，如果将光源换成粒子源，譬如具有一定速度（这表明其对应的波有确定的波长）的电子束，人们得到完全同样类型的条纹。这显得更为古怪，因为如果只有一条裂缝，则得不到任何条纹，只不过是电子通过这屏幕的均匀分布。人们因此可能会想到，另开一条缝只不过是打到屏幕上每一点的电子数目增加而已。但是，实际上

由于干涉，在某些地方反而减少了。如果在一个时刻只有一个电子被发出通过狭缝，人们会以为，每个电子只穿过这条或那条缝，这样它的行为正如只存在通过的那条缝一样——屏幕会给出一个均匀的分布。然而，实际上即便每次一个地发出电子，条纹仍然出现。因此，每个电子准是在同一时刻通过两条小缝！

粒子间的干涉现象，对于我们理解原子的结构至为关键，后者是作为化学和生物的基元，以及由之组成我们和我们周围所有一切的构件。在20世纪初，人们认为原子和行星围绕着太阳公转相当类似，电子（带负电荷的粒子）围绕着带正电荷的中心的核公转。人们以为正电荷和负电荷之间的吸引力维持电子的轨道，正如同行星和太阳之间的万有引力维持行星的轨道一样。麻烦在于，在量子力学之前，力学和电学的定律预言，电子会失去能量并以螺旋线的轨道落向并最终撞击到核上去。这表明原子（实际上所有的物质）都会很快地坍缩成一种非常高密度的状态。丹麦科学家尼尔斯·玻尔在1913年，为此问题找到了部分的解答。他提出，也许电子不能在离中心核任意远的地方，而只能在一些指定的距离处公转。如果我们再假定，只有一个或两个电子能在这些距离上的任意轨道上公转，因为电子除了充满最小距离和最小能量的轨道外，不能进一步向里螺旋靠近，这就解决了原子坍缩的问题。

对于最简单的原子——氢原子，这个模型给出了相当好的解释，这里只有一个电子围绕着原子核运动。但人们不清楚如何将其推广到更复杂的原子上去。并且，可允许轨道有限集合的思想似乎显得非常任意。量子力学的新理论解决了这一困难。原来一个围绕核运动的电子可被认为成一个波，其波长依赖于其速度。对于一定的轨道，轨道的长度对应于整数（而不是分数）倍电子的波长。对于这些轨道，每绕一圈波峰总在同一位置，所以波就相互叠加；这些轨道对应于玻尔的可允许的轨道。然而，对于那些长度不为波长整数倍的轨道，当电子围绕着运动时，每个波峰将最终被波谷抵消；这些轨道是不允许的。

美国科学家理查德·费恩曼引入的所谓对历史求和（即路径积分）的方法是一个摹写波粒二象性的好方法。在这方法中，粒子不像在经典亦即非量子理论中那样，在时空中只有一个历史或一个路径。相反，假定粒子从A到B可走所有可能的轨道。和每个路径相关存在一对数：一个数表示波的幅度；另一个表示在周期循环中的位置（即相位）。从A走到B的概率是将所有路径的波加起来。一般说来，如果比较一族邻近的路

径，相位或周期循环中的位置会差别很大。这意味着，相应于这些轨道的波几乎都相互抵消了。然而，对于某些邻近路径的集合，它们之间的相位变化不大，这些路径的波不会抵消。这种路径对应于玻尔的允许轨道。

利用这些思想，以具体的数学形式，可以相对直截了当地计算更复杂的原子甚至分子的允许轨道。分子是由一些原子因轨道上的电子围绕不止一个原子核运动而束缚在一起形成的。由于分子的结构，以及它们之间的反应构成了化学和生物的基础，除了受不确定性原理限制之外，在原则上，量子力学允许我们预言围绕我们的几乎一切东西。（然而，实际上对一个包含稍多电子的系统需要的计算如此之复杂，以至于使我们做不到。）

看来，爱因斯坦广义相对论制约了宇宙的大尺度结构。它是所谓的经典理论；那就是说，它没有考虑到量子力学的不确定性原理，而为了和其他理论一致这是必需的。因为我们通常感觉到的引力场非常弱，所以这个理论并没导致和观测的偏离。然而，早先讨论的奇点定理指出，至少在两种情形下引力场会变得非常强——黑洞和大爆炸。在这样强的场里，量子力学效应应该是非常重要的。因此，在某种意义上，经典广义相对论由于预言无限大密度的点而预示了自身的垮台，正如同经典（也就是非量子）力学由于隐含着原子必须坍缩成无限的密度，而预言自身的垮台一样。我们还没有一个完备的协调的统一广义相对论和量子力学的理论，但是我们已知这个理论所应有的一系列特征。在以下几章我们将描述这些对黑洞和大爆炸的效应。然而，此刻我们先转去介绍人类新近的尝试，他们试图将对自然界中其他力的理解合并成一个单独的统一的量子理论。

第5章　基本粒子和自然的力

亚里士多德相信宇宙中的所有物质由4种基本元素即土、气、火和水组成。有两种力作用在这些元素上：引力，这是指土和水往下沉的趋势；浮力，这是指气和火往上升的倾向。将宇宙的内容分割成物质和力的这种做法一直沿袭至今。

亚里士多德相信物质是连续的，也就是说，人们可以将物质无限制地分割成越来越小的小块。即人们永远不可能得到一个不可再分割下去的最小颗粒。然而几个希腊人，例如德谟克里特，则坚持物质具有固有的颗粒性，而且认为每一件东西都是由大量的各种不同类型的原子组成（原子在希腊文中的意义是“不可分的”）。争论一直持续了几个世纪，任何一方都没有任何实际的证据。但是1803年英国的化学家兼物理学家约翰·道尔顿指出，化合物总是以一定的比例结合而成的，这一事实可以用由原子聚合一起形成称作分子的个体来解释。然而，直到20世纪初这两个学派的争论才以原子论者的胜利而告终。爱因斯坦提供了其中一个重要的物理学证据。1905年，在他关于狭义相对论的著名论文发表前的几周，他在发表的另一篇文章里指出，所谓的布朗运动——悬浮在液体中尘埃小颗粒的无规则随机运动——可以解释为液体原子和灰尘粒子碰撞的效应。

当时就有人怀疑，这些原子终究不是不可分割的。几年前，一位剑桥大学三一学院的研究员汤姆孙演示了一种称为电子的物质粒子存在的证据。电子具有的质量比最轻原子的一千分之一还小。他使用了一种和现代电视显像管相类似的装置：由一根红热的金属细丝发射出电子，由于它们带负电荷，可用电场将其朝一个涂磷光物质的屏幕加速。电子一打到屏幕上就会产生一束束的闪光。人们很快即意识到，这些电子一定是从原子本身释放出来的。新西兰物理学家恩斯特·卢瑟福在1911年最后证明了物质的原子确实具有内部结构：它们是由一个极其微小的带正电荷的核以及围绕着它公转的一些电子组成。他分析从放射性原子释放出的带正电荷的α粒子和原子碰撞会引起偏转的方式，从而推出这一结论。

最初，人们认为原子核是由电子和不同数量的带正电的叫作质子的

粒子组成。质子是由希腊文中表达“第一”的词演化而来的，因为质子被认为是组成物质的基本单位。然而，1932年卢瑟福在剑桥的一位同事詹姆斯·查德威克发现，原子核还包含另外称为中子的粒子，中子几乎具有和质子一样大的质量但不带电荷。查德威克因这个发现获得诺贝尔奖，并被选为剑桥龚维尔和基斯学院（我即为该学院的研究员）院长。后来，他因为和其他人不和而辞去院长的职务。一群战后回来的年轻的研究员将许多已占据位置多年的老研究员选掉后，曾有过一场激烈的辩论。这是在我去以前发生的；我在这场争论尾声的1965年才加入该学院，当时另一位获诺贝尔奖的院长奈维尔·莫特爵士也因类似的争论而辞职。

直到大约30年以前，人们还以为质子和中子是“基本”粒子。但是，质子和另外的质子或电子高速碰撞的实验表明，它们事实上是由更小的粒子构成的。加州理工学院的牟雷·盖尔曼将这些粒子命名为夸克。由于对夸克的研究，他获得1969年的诺贝尔奖。此名字起源于詹姆斯·乔伊斯神秘的引语：“Three quarks for Muster Mark ！”夸克这个字应发夸脱的音，但是最后的字母是k而不是t，通常和拉克（云雀）相押韵。

存在有几种不同类型的夸克——有六种“味”，这些味我们分别称之为上、下、奇、粲、底和顶。20世纪60年代起人们就知道前三种夸克，1974年才发现粲夸克，1977年和1995年分别发现底夸克和顶夸克。每种味都带有三种“色”，即红、绿和蓝。（必须强调，这些术语仅仅是标签：夸克比可见光的波长小得多，所以在通常意义下没有任何颜色。这只不过是现代物理学家似乎更富有想象力地命名新粒子和新现象的方式而已——他们不再让自己受限制于希腊文！）一个质子或中子由三个夸克组成，每个夸克各有一种颜色。一个质子包含两个上夸克和一个下夸克；一个中子包含两个下夸克和一个上夸克。我们可以创生由其他种类的夸克（奇、粲、底和顶）构成的粒子，但所有这些都具有大得多的质量，并非常快地衰变成质子和中子。

现在我们知道，不管是原子还是其中的质子和中子都不是不可分的。问题在于什么是真正的基本粒子——构成世界万物的最基本的构件？由于光波波长比原子的尺度大得多，我们不能期望以通常的方法去“看”一个原子的部分。我们必须用某些波长短得多的东西。正如我们在上一章所看到的，量子力学告诉我们，实际上所有粒子都是波，粒子的能量越高，则其对应的波的波长越短。所以，我们能对这个问题给出

的最好的回答，取决于我们装置中的粒子能量有多高，因为这决定了我们能看到的尺度有多小。这些粒子的能量通常用叫作电子伏特的单位来测量。（在汤姆孙的电子实验中，我们看到他用一个电场去加速电子，一个电子从一个伏特的电场所得到的能量即是一个电子伏特。）19世纪，当人们知道使用的粒子能量只是由化学反应——诸如燃烧——产生的几个电子伏特的低能量时，大家以为原子即是最小的单位。在卢瑟福的实验中，α粒子具有几百万电子伏特的能量。更晚的时代，我们获悉如何使用电磁场给粒子提供首先是几百万，然后是几十亿电子伏特的能量。这样我们知道，30年之前以为是“基本”的粒子，事实上是由更小的粒子组成。如果我们利用更高的能量时，是否会发现这些粒子是由更小的粒子组成的呢？这一定是可能的。但我们确实有一些理论上的原因，相信我们已经拥有，或者说接近拥有自然的终极构件的知识。

用上一章讨论的波粒二象性，包括光和引力的宇宙中的一切都能以粒子来描述。这些粒子有一种称为自旋的性质。考虑自旋的一个方法是将粒子想象成围绕着一个轴自转的小陀螺。然而，这可能会引起误会，因为量子力学告诉我们，粒子并没有任何轮廓分明的轴。粒子的自旋真正告诉我们的是，从不同的方向看粒子是什么样子的。一个自旋为0的粒子像一个点：从任何方向看都一样〔图5.1（i）〕。另一方面，自旋为1的粒子像一个箭头：从不同方向看是不同的〔图5.1（ii）〕。只有把它转过一整圈（360°）时，这粒子才显得一样。自旋为2的粒子像个双头的箭头〔图5.1（iii）〕：只要把它转过半圈（180°），它看起来便一样。类似地，把更高自旋的粒子转了整圈的更小的部分后，它看起来便一样。所有这一切都是这样的直截了当，但惊人的事实是，把有些粒子转过一圈后，它仍然显得不同：你必须使其转两整圈！这样的粒子就说具有1/2的自旋。

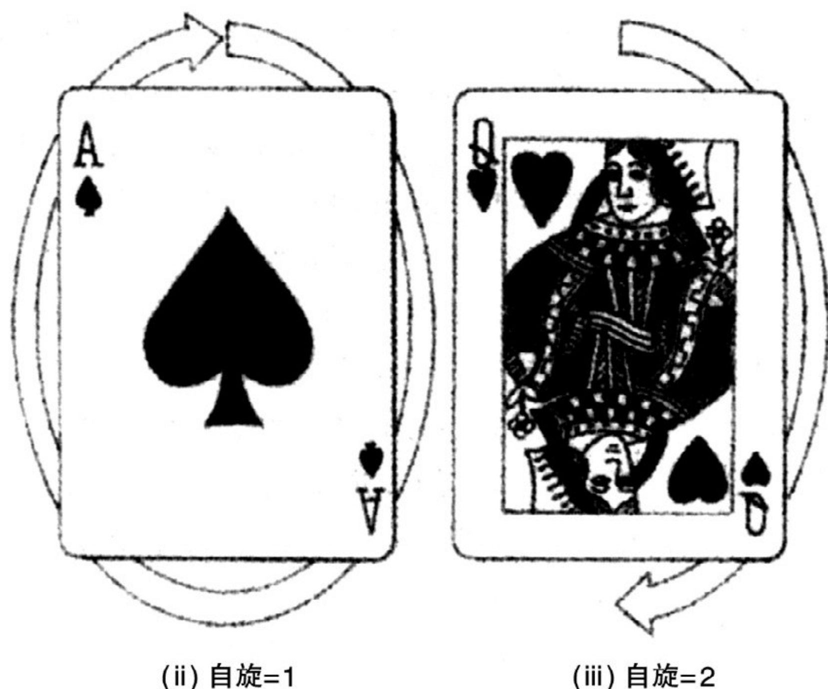


图5.1

宇宙间所有已知的粒子可以分成两组：自旋为1/2的粒子，它们组成宇宙中的物质；自旋为0、1和2的粒子，正如我们将要看到的，它们在物质粒子之间产生力。物质粒子服从所谓的泡利不相容原理。这是奥地利物理学家沃尔夫冈·泡利在1925年发现的，他因此而获得1945年的诺贝尔奖。他是个原型的理论物理学家，有人这样说，他的存在甚至会使同一城市里的实验出毛病！泡利不相容原理是说，两个类似的粒子不能存在于相同的态中，也就是说，在不确定性原理给出的限制下，它们不能同时具有相同的位置和速度。不相容原理是非常关键的，因为它解释了为何物质粒子，在自旋为0、1和2的粒子产生的力的影响下，不会坍缩成密度非常高的状态的原因：如果物质粒子几乎处在相同的位置，则它们必须有不同的速度，这意味着它们不会长时间存在于相同的位置。如果世界在没有不相容原理的情形下创生，夸克将不会形成分离的轮廓分明的质子和中子，进而这些也不可能和电子形成分离的轮廓分明的原子。它们全部都会坍缩形成大致均匀的稠密的“汤”。

直到保罗·狄拉克在1928年提出一个理论，人们才对电子和其他自旋1/2的粒子有了正确的理解。狄拉克后来被选为剑桥的卢卡斯数学教授（牛顿曾经担任这一教席，目前我担任这一职务）。狄拉克理论是第一种既和量子力学又和狭义相对论相一致的理论。它在数学上解释了为何电子具有1/2的自旋，即为什么将其转一整圈不能、而转两整圈才能使它显得一样。它还预言了电子必须有它的配偶——反电子或正电子。1932年正电子的发现证实了狄拉克的理论，他因此获得了1933年的诺贝尔奖。现在我们知道，任何粒子都有会和它相湮灭的反粒子（对于携带力的粒子，反粒子即为其自身）。也可能存在由反粒子构成的整个反世界和反人。然而，如果你遇到了反自身，注意不要握手！否则，你们两人都会在一个巨大的闪光中消失殆尽。为何我们周围的粒子比反粒子多得多是一个极端重要的问题，我将会在本章的后部分回到这问题上来。

在量子力学中，所有物质粒子之间的力或相互作用都认为是由自旋为整数0、1或2的粒子携带。所发生的是，物质粒子——譬如电子或夸克——发出携带力的粒子。这个发射引起的反弹，改变了物质粒子的速度。携带力的粒子然后和另一个物质粒子碰撞并且被吸收。这碰撞改变了第二个粒子的速度，正如同这两个物质粒子之间存在过一个力。携带力的粒子不服从泡利不相容原理，这是它们的一个重要的性质。这表明它们能被交换的数目不受限制，这样它们就可以引起很强的力。然而，如果携带力的粒子具有很大的质量，则在大距离上产生和交换它们就会很困难。这样，它们所携带的力只能是短程的。另一方面，如果携带力的粒子本身质量为零，力就是长程的了。因为在物质粒子之间交换的携带力的粒子，不像“实”粒子那样可以用粒子探测器检测到，所以称为虚粒子。然而，因为它们具有可测量的效应，即它们引起了物质粒子之间的力，所以我们知道它们存在。自旋为0、1或2的粒子在某些情况下也作为实粒子存在，这时它们可以被直接探测到。对我们而言，此刻它们就呈现出经典物理学家称为波动形式，例如光波和引力波的东西。当物质粒子以交换携带力的虚粒子的形式而相互作用时，它们有时就可以被发射出来。（例如，两个电子之间的电排斥力是由于交换虚光子所致，这些虚光子永远不可能被检测出来；但是如果一个电子从另一个电子边穿过，则可以放出实光子，它作为光波而被我们探测到。）

携带力的粒子按照其强度以及与其相互作用的粒子可以分成4个种类。必须强调指出，这种将力划分成4种是人为的；它仅仅是为了便于

建立部分理论，而并不别具深意。大部分物理学家希望最终找到一个统一理论，该理论将4种力解释为一个单独的力的不同方面。确实，许多人认为这是当代物理学的首要目标。最近，将4种力中的3种统一起来已经有了成功的端倪——我将在这一章描述这些内容。而关于统一余下的另一种力即引力的问题将留到以后。

第一种力是引力，这种力是万有的，也就是说，每一个粒子都因它的质量或能量而感受到引力。引力比其他3种力都弱得多。它是如此之弱，它若不具有两个特别的性质，我们根本就不可能注意到：它能作用到大距离去，以及它总是吸引的。这意味着，在像地球和太阳这样两个巨大的物体中，单独粒子之间的非常弱的引力都能叠加起来而产生相当大的力量。其他3种力要么是短程的，要么时而吸引时而排斥，所以它们倾向于相互抵消。以量子力学的方法来看待引力场，人们把两个物质粒子之间的力描述成由称作引力子的自旋为2的粒子携带的。它自身没有质量，所以携带的力是长程的。太阳和地球之间的引力可以归结为构成这两个物体的粒子之间的引力子交换。虽然所交换的粒子是虚的，它们确实产生了可测量的效应——它们使地球围绕着太阳公转！实引力子构成了经典物理学家称之为引力波的东西，它是如此之弱——并且要探测到它是如此之困难，以至于还从来未被观测到过（引力波于2016年被NASA探测到了。——编者注）。

另一种力是电磁力。它作用于带电荷的粒子（例如电子和夸克）之间，但不和不带电荷的粒子（例如引力子）相互作用。它比引力强得多：两个电子之间的电磁力比引力大约大100亿亿亿亿亿（在1后面有42个0）倍。然而，存在两种电荷——正电荷和负电荷。同种电荷之间的力是相互排斥的，而异种电荷之间的力则是相互吸引的。一个大的物体，譬如地球或太阳，包含了几乎等量的正电荷和负电荷。这样，由于单独粒子之间的吸引力和排斥力几乎全被抵消了，因此两个物体之间净的电磁力非常小。然而，电磁力在原子和分子的小尺度下起主要作用。在带负电的电子和带正电的核中的质子之间的电磁力使得电子围绕着原子的核公转，正如同引力使得地球围绕着太阳公转一样。人们将电磁吸引力描绘成是由于交换大量称作光子的无质量的自旋为1的虚粒子引起的。重复一下，这里交换的光子是虚粒子。但是，电子从一个允许轨道转变到另一个离核更近的允许轨道时，释放能量并且发射出实光子——如果其波长适当，则作为可见光可被肉眼观察到，或可用诸如照相底版的光子探测器观察到。同样，如果一个光子和原子相碰撞，可将电子从

离核较近的允许轨道移动到较远的轨道。这样光子的能量被消耗掉，它也就被吸收了。

第三种力称为弱核力。它负责放射性现象，并只作用于自旋为1/2的所有物质粒子，而对诸如光子、引力子等自旋为0、1或2的粒子不起作用。直到1967年伦敦帝国学院的阿伯达斯·萨拉姆和哈佛的史蒂芬·温伯格提出了弱作用和电磁作用的统一理论后，弱作用才被很好地理解。此举在物理学界所引起的震动，可与大约100年前麦克斯韦统一电学和磁学相提并论。他们提出，除了光子，还存在其他3个自旋为1的被统称作重矢量玻色子的粒子，它们携带弱力。它们称作W^{+}（$W_{\text{正}}$）、W^{-}（$W_{\text{负}}$）和Z^{0}（$Z_{\text{零}}$），每一个都具有大约100吉电子伏的质量（1吉电子伏为10亿电子伏）。温伯格—萨拉姆理论展现了称作对称自发破缺的性质。这意味着，在低能量下一些看起来完全不同的粒子，事实上发现都只是同一种粒子处于不同的状态。所有这些粒子在高能量下都有相似的行为。这个效应和轮赌盘上的轮赌球的行为相类似。在高能量下（当这轮子转得很快时），这球的行为基本上只有一个方式——即不断地滚动着。但是随着轮子变慢下来，球的能量减小，最终球就陷到轮子上的37个槽中的一个里去。换言之，在低能下球可以存在于37种不同的状态。如果由于某种原因，我们只能在低能下观察球，我们就会以为存在37种不同类型的球！

在温伯格—萨拉姆理论中，当能量远远超过100吉电子伏时，这三种新粒子和光子的行为方式很相似。但是，大部分正常情况下粒子能量要比这低，粒子之间的对称被破坏了。W^{+}、W^{-}和Z^{0}得到了大的质量，使之携带的力变成非常短程。萨拉姆和温伯格提出此理论时，很少人相信他们，因为加速器还未强大到将粒子加速到产生实的W^{+}、W^{-}和Z^{0}粒子所需的100吉电子伏的能量。但在此后的十几年里，在较低能量下这个理论的其他预言和实验符合得这样好，使他们和同在哈佛的谢尔登·格拉肖一起获得1979年的诺贝尔物理学奖。格拉肖提出过一个类似的统一电磁和弱作用的理论。由于1983年在CERN（欧洲核子研究中心）发现了具有被正确预言的质量和其他性质的光子的3个有质量的伴侣，使得诺贝尔委员会避免了犯错误的难堪。领导几百名物理学家作出此发现的卡罗·鲁比亚和开发了被使用的反物质储藏系统的CERN工程师西蒙·范德·米尔分享了1984年的诺贝尔奖。（除非你已经是巅峰人物，当今要在实验物理学上留下痕迹极其困难！）

第四种力是强核力。它将质子和中子中的夸克束缚在一起，并将原子核中的质子和中子束缚在一起。人们相信，称为胶子的另一种自旋为1的粒子携带强作用力。它只能与自身以及与夸克相互作用。强核力具有一种称为禁闭的古怪性质：它总是把粒子束缚成不带颜色的结合体。由于夸克有颜色（红、绿或蓝），人们不能得到单独的夸克自身。相反，一个红夸克必须用一串胶子和一个绿夸克以及一个蓝夸克连接在一起（红＋绿＋蓝＝白）。这样的三胞胎构成了一个质子或中子。其他的可能性是由一个夸克和一个反夸克组成的对（红＋反红，或绿＋反绿，或蓝＋反蓝＝白）。这样的结合体构成了称为介子的粒子。介子是不稳定的，因为夸克和反夸克会相互湮灭而产生电子和其他粒子。类似地，由于胶子也有颜色，色禁闭使得人们不可能得到单独的胶子自身。相反，人们所能得到的胶子的团，其叠加起来的颜色必须是白色的。这样的团形成了称为胶球的不稳定粒子。

色禁闭使得人们观察不到一个孤立的夸克或胶子，这事实使得将夸克和胶子当作粒子的整个见解看起来有点玄学的味道。然而，强核力还有一种叫作渐近自由的性质，它使得夸克和胶子成为意义明确的概念。在正常能量下，强核力确实很强，它将夸克紧紧地捆在一起。但是，大型粒子加速器的实验指出，强作用力在高能量下变得弱得多，夸克和胶子的行为就几乎像自由粒子那样。图5.2是一张显示一个高能质子和一个高能反质子碰撞的照片。

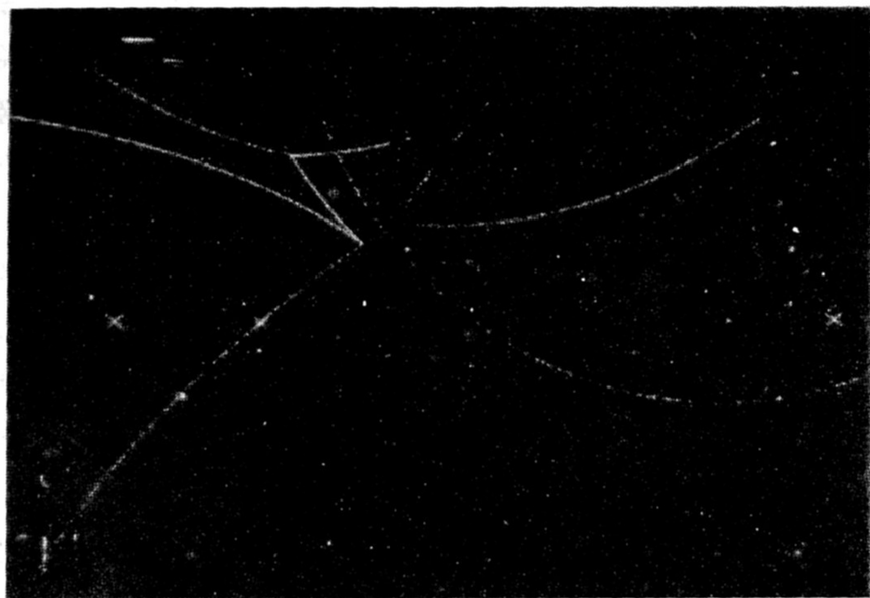


图5.2　一个质子和一个反质子在高能下碰撞，产生了一对几乎自由的夸克

统一电磁力和弱核力的成功，使人们多次试图将这两种力和强核力合并在所谓的大统一理论（或GUT）之中。这名字相当夸张：得到的理论并不那么辉煌，也没能将全部力都统一进去，因为它并不包含引力。它们也不是真正完整的理论，因为它们包含了许多不能从这理论中预言而必须人为地选择去适合实验的参数。尽管如此，它们可能是朝着完备的统一理论推进的一步。GUT的基本思想是这样：正如前面提到的，在高能量下强核力变弱了；另一方面，不是渐近自由的电磁力和弱力在高能量下变强了。在某个非常高的叫作大统一能量的能量下，这3种力都具有同样的强度，并因此可看成一个单独的力的不同方面。在这能量下，GUT还预言了自旋为1/2的不同物质粒子（如夸克和电子）也会根本上都变成一样，这样导致了另一种统一。

大统一能量的数值还知道得不太清楚，可能至少有1000万亿吉电子伏特。而目前粒子加速器只能使大致能量为100吉电子伏的粒子相碰撞，而计划建造的机器的能量可升到几千吉电子伏。要建造足以将粒子加速到大统一能量的机器，其体积必须和太阳系一样大——这在现代经济环境下不太可能做到。因此，不可能在实验室里直接检验大统一理论。然而，如同在弱电统一理论中那样，我们可以检验它在低能量下的推论。

其中最有趣的预言是，构成通常物质的大部分质量的质子能够自发衰变成诸如反电子之类更轻的粒子。之所以可能，其原因在于，在大统一能量下，夸克和反电子之间没有本质的不同。在正常情况下一个质子中的三个夸克没有足够能量转变成反电子，由于不确定性原理意味着质子中夸克的能量不可能严格不变，其中一个夸克会非常偶然地获得足够能量进行这种转变。这样质子就要衰变。夸克要得到足够能量的概率是如此之低，至少要等待100万亿亿亿（1后面跟30个0）年才能有1次。这比宇宙从大爆炸以来的年龄（大约100亿年——1后面跟10个0）要长得多了。因此，人们会认为不可能在实验上检测到质子自发衰变的可能性。然而，人们可以观察包含极大数量质子的大量物质，以增加检测衰变的机会。（譬如，如果观察的对象含有1后面跟31个0个质子，按照最简单的GUT，可以预料在1年内应能看到多于一次的质子衰变）。

人们进行了一系列实验，可惜没有得到任何质子或中子衰变的确实证据。有一个实验是在俄亥俄的莫尔顿盐矿里进行的（为了避免其他因

宇宙射线引起的会和质子衰变相混淆的事件发生），用了8000吨水。由于在实验中没有观测到自发的质子衰变，因此可以估算出，可能的质子寿命至少应为1000万亿亿亿（1后面跟31个0）年。这比简单的大统一理论所预言的寿命更长。然而，一些更精致的大统一理论预言的寿命比这更长，因此需要用更灵敏的手段对甚至更大量的物质进行检验。

尽管观测质子的自发衰变非常困难，但很可能正由于这相反的过程，即质子，或更简单地说，夸克的产生导致了我们的存在。它们是从宇宙开初的可以想像的最自然的方式——夸克并不比反夸克更多的状态下产生的。地球上的物质主要是由质子和中子，进而由夸克构成。除了少数由物理学家在大型粒子加速器中产生的以外，不存在由反夸克构成的反质子和反中子。从宇宙线中得到的证据表明，我们星系中的所有物质也是这样：除了少数当粒子和反粒子对进行高能碰撞时产生的以外，没有发现反质子和反中子。如果在我们星系中有很大区域的反物质，则可以预料，在正反物质的边界会观测到大量的辐射。许多粒子在那里和它们的反粒子相碰撞、相互湮灭并释放出高能辐射。

我们没有直接的证据，表明其他星系中的物质是由质子、中子还是由反质子、反中子构成，但两者必居其一，在单一的宇宙中不能有混合，否则，我们又会观察到大量由湮灭产生的辐射。因此，我们相信，所有的星系是由夸克而不是反夸克构成；看来，一些星系为物质，而另一些星系为反物质也是难以置信的。

为什么夸克比反夸克多这么多？为何它们的数目不相等？这数目有所不同肯定使我们交了好运，否则，早期宇宙中它们势必已经相互湮灭了，只余下一个充满辐射而几乎没有物质的宇宙。因此，后来也就不会有人类生命赖以发展的星系、恒星和行星。庆幸的是，大统一理论可以解释，尽管甚至刚开始时两者数量相等，为何现在宇宙中夸克比反夸克多。正如我们已经看到的，大统一理论允许夸克变成高能下的反电子。它们也允许相反的过程，反夸克变成电子，电子和反电子变成反夸克和夸克。在极早期宇宙有一时期是如此之热，粒子能量高到足以发生这些转变。但是，它为何使夸克比反夸克多呢？原因在于，物理定律对于粒子和反粒子不是完全相同的。

直到1956年人们都相信，物理定律分别服从三个叫作C、P和T的对称。C（电荷）对称的意义是，定律对于粒子和反粒子是相同的；P（宇称）对称的意义是，定律对于任何情景和它的镜像（右手方向自旋的粒

子的镜像变成了左手方向自旋的粒子）是相同的；T（时间）对称的意义是，如果你颠倒所有粒子和反粒子的运动方向，系统应回到早先的那样；换言之，定律对于前进或后退的时间方向是一样的。1956年，两位美国物理学家李政道和杨振宁提出弱作用实际上不服从P对称。换言之，弱力使得宇宙和宇宙的镜像以不同的方式发展。同一年，他们的一位同事吴健雄证明了他们的预言是正确的。她把放射性原子的核排列在磁场中，使它们的自旋方向一致。实验表明，在一个方向比另一方向发射出得更多电子。次年，李和杨为此获得诺贝尔奖。人们还发现弱作用不服从C对称，即是说，它使得由反粒子构成的宇宙以和我们的宇宙不同的方式行为。尽管如此，弱力似乎确实服从CP联合对称。也就是说，如果每个粒子都用其反粒子来取代，则由此构成的宇宙的镜像和原来的宇宙以同样的方式发展！然而，1964年，还是两个美国人——J.W.克罗宁和瓦尔·费兹——发现，在某种称为K介子的衰变中，甚至连CP对称也不服从。1980年，克罗宁和费兹最终由于他们的研究而获得诺贝尔奖。（很多奖是因为显示宇宙不像我们曾经想象的那么简单而授予的！）

有一个数学定理说，任何服从量子力学和相对论的理论必须服从CPT联合对称。换言之，如果同时用反粒子来置换粒子，取镜像还有时间反演，则宇宙的行为必须是一样的。但是，克罗宁和费兹指出，如果仅仅用反粒子来取代粒子，并且采用镜像，但不反演时间方向，则宇宙的行为不相同。所以，如果人们反演时间方向，物理学定律必须改变——它们不服从T对称。

早期宇宙肯定是不服从T对称的：随着时间前进，宇宙膨胀——如果它往后倒退，则宇宙收缩。而且，由于存在着不服从T对称的力，因此当宇宙膨胀时，相对于将电子变成反夸克，这些力将更多的反电子变成夸克。然后，随着宇宙膨胀并冷却下来，反夸克就和夸克湮灭，但由于已有的夸克比反夸克多，少量过剩的夸克就留下来。正是它们构成我们今天看到的物质，由这些物质构成了我们自身。这样，我们自身之存在可认为是大统一理论的证实，哪怕仅仅是定性的而已；但此预言的不确定性到了这种程度，以至于我们不能知道在湮灭之后余下的夸克数目，甚至不知是夸克还是反夸克余下。（然而，如果是反夸克多余留下，我们可以简单地把反夸克称为夸克，夸克称为反夸克。）

大统一理论不包括引力。在我们处理基本粒子或原子问题时这关系不大，因为引力是如此之弱，通常可以忽略它的效应。然而，它的作用

既是长程的，又总是吸引的事实，表明它的所有效应是叠加的。所以，对于足够大量的物质粒子，引力会比其他所有的力都更重要。这就是为什么正是引力决定了宇宙的演化的缘故。甚至对于恒星大小的物体，引力的吸引会超过所有其他的力，并使恒星坍缩。我在20世纪70年代的工作是集中于研究黑洞。黑洞就是由这种恒星的坍缩和围绕它们的强大的引力场产生的。正是黑洞研究给出了量子力学和广义相对论如何相互影响的第一个暗示——亦即尚未成功的量子引力论形态的一瞥。

第6章　黑洞

黑洞这一术语是不久以前才出现的。1969年美国科学家约翰·惠勒，为了形象地描述至少可回溯到200年前的一个观念时，杜撰了这个名词。那时候，共有两种光理论：一种是牛顿赞成的光的微粒说；另一种是光由波构成的波动说。我们现在知道，这两者在实际上都是正确的。由于量子力学的波粒二象性，光既可认为是波，也可认为是粒子。在光的波动说中，不清楚光对引力如何响应。但是如果光是由粒子组成的，人们可以预料，它们正如同炮弹、火箭和行星一样受引力的影响。人们起先以为，光粒子无限快地运动，所以引力不可能使之缓慢下来，但是罗默关于光以有限速度行进的发现意味着，引力对之可有重要效应。

1783年，剑桥的学监约翰·米歇尔在这个假定的基础上，于《伦敦皇家学会哲学学报》上发表了一篇文章。他指出，一个质量足够大并足够致密的恒星会有如此强大的引力场，甚至连光线都不能逃逸：任何从恒星表面发出的光，在还没到达远处前就会被恒星的引力吸引回来。米歇尔暗示，可能存在大量这样的恒星，虽然由于从它们那里发出的光不会到达我们这里，我们不能看到它们；但是我们仍然可以感到它们引力的吸引。这正是我们现在称为黑洞的物体。它是名副其实的——在空间中的黑的空洞。几年之后，法国科学家拉普拉斯侯爵显然独自地提出了和米歇尔类似的观念。非常有趣的是，拉普拉斯只将此观点纳入他的《世界系统》一书的第一版和第二版中，而在以后的版本中将其删去；也许他认为这是一个愚蠢的观念。（还有，光的微粒说在19世纪变得不时髦了；似乎一切都可以以波动理论来解释，而按照波动理论，不清楚光究竟是否受到引力的影响。）

事实上，因为光速是固定的，所以在牛顿引力论中将光类似炮弹那样处理不很协调。（从地面发射上天的炮弹被引力减速，最后停止上升并折回地面；然而，一个光子必须以不变的速度继续向上，那么，牛顿引力如何影响光呢？）直到1915年爱因斯坦提出广义相对论，才得到引力如何影响光的协调理论。甚至又过了很长时间，人们才理解这个理论对大质量恒星的含意。

为了理解黑洞是如何形成的，我们首先需要理解恒星的生命周期。

起初，大量的气体（绝大部分为氢）受自身的引力吸引，而开始向自身坍缩而形成恒星。当它收缩时，气体原子越来越频繁地以越来越大的速度相互碰撞——气体的温度上升。最后，气体变得如此之热，以至于当氢原子碰撞时，它们不再弹开而是聚合形成氦。如同一个受控氢弹爆炸，反应中释放出来的热使得恒星发光。这附加的热又使气体的压力升高，直到它足以平衡引力的吸引，这时气体停止收缩。这有一点像气球——内部气压试图使气球膨胀，橡皮的张力试图使气球收缩，它们之间存在一个平衡。从核反应发出的热和引力吸引的平衡，使恒星在很长时间内维持这种平衡。然而，恒星最终会耗尽它的氢和其他核燃料。貌似大谬，其实不然的是，恒星初始的燃料越多，它则被越快燃尽。这是因为恒星的质量越大，它就必须越热才足以抵抗引力。而它越热，它的燃料就被耗得越快。我们的太阳大概足够再燃烧50多亿年，但是质量更大的恒星可以在1亿年这么短的时间内耗尽其燃料，这个时间尺度比宇宙的年龄短得多了。当恒星耗尽了燃料，它开始变冷并收缩。随后发生的情况只有等到20世纪20年代末才首次被人们理解。

1928年，一位印度研究生——萨拉玛尼安·钱德拉塞卡——乘船来英国剑桥跟英国天文学家兼广义相对论家阿瑟·爱丁顿爵士学习。（据记载，在20世纪20年代初，有一位记者告诉爱丁顿，说他听说世界上只有3个人能理解广义相对论。爱丁顿停顿了一下，然后回答：“我正在想这第三个人是谁？”）在从印度来英国的旅途中，钱德拉塞卡算出了在耗尽所有燃料之后，多大的恒星仍然可以对抗自己的引力而维持本身。这个思想是说：当恒星变小时，物质粒子相互靠得非常近，而按照泡利不相容原理，它们必须有非常不同的速度。这使得它们相互散开并企图使恒星膨胀。因此，一颗恒星可因引力的吸引和不相容原理引起的排斥达到的平衡，而保持其半径不变，正如同在它的生命的早期引力被热平衡一样。

然而，钱德拉塞卡意识到，不相容原理所能提供的排斥力有一个极限。相对论把恒星中的粒子的最大速度差限制为光速。这意味着，当恒星变得足够密集之时，由不相容原理引起的排斥力就会比引力的作用小。钱德拉塞卡计算出，一个质量比大约太阳质量一倍半还大的冷的恒星不能维持本身以抵抗自己的引力。（这质量现在称为钱德拉塞卡极限。）苏联科学家列夫·达维多维奇·朗道差不多同时得到了类似的发现。

这对大质量恒星的最终归宿具有重大的意义。如果一颗恒星的质量

比钱德拉塞卡极限小，它最后会停止收缩，并且变成一种可能的终态即“白矮星”。白矮星的半径为几千英里，密度为每立方英寸几百吨。白矮星是由它物质中电子之间的不相容原理排斥力支持的。我们观察到大量这样的白矮星。围绕着天狼星转动的那颗是最早被发现的白矮星中的一个，天狼星是夜空中最亮的恒星。

朗道指出，恒星还存在另一种可能的终态。其极限质量大约也为太阳质量的一倍或二倍，但是其体积甚至比白矮星还小得多。这些恒星是由中子和质子之间，而不是电子之间的不相容原理排斥力支持的。所以它们叫作中子星。它们的半径只有10英里左右，密度为每立方英寸几亿吨。在第一次预言中子星时，没有任何方法去观察它。实际上，它们很久以后才被探测到。

另一方面，质量比钱德拉塞卡极限还大的恒星在耗尽其燃料时，会出现一个很大的问题。在某种情形下，它们会爆炸或设法抛出足够的物质，使它们的质量减小到极限之下，以避免灾难性的引力坍缩。但是很难令人相信，不管恒星有多大，这总会发生。怎么知道它一定损失质量呢？即使每个恒星都设法失去足够多的质量以避免坍缩，如果你把更多的质量加在白矮星或中子星上，以使之超过极限，将会发生什么？它会坍缩到无限密度吗？爱丁顿为此感到震惊，他拒绝相信钱德拉塞卡的结果。爱丁顿认为，一颗恒星是根本不可能坍缩成一点的。这是大多数科学家的观点：爱因斯坦自己写了一篇论文，宣布恒星的体积不会收缩为零。其他科学家，尤其是他以前的老师，恒星结构的主要权威——爱丁顿的敌意使钱德拉塞卡放弃了这方面的工作，而转去研究诸如恒星团运动等其他天文学问题。然而，他之所以获得1983年诺贝尔奖，至少部分原因在于他早年所做的关于冷恒星的质量极限的工作。

钱德拉塞卡指出，不相容原理不能够阻止质量大于钱德拉塞卡极限的恒星发生坍缩。但是，根据广义相对论，这样的恒星会发生什么情况呢？1939年一位美国的年轻人罗伯特·奥本海默首次解决了这个问题。然而，他所获得的结果表明，用当时的望远镜去检测不会有任何观测结果。以后，第二次世界大战爆发，奥本海默本人非常专心地从事原子弹研制。战后，由于大多数科学家被吸引到原子和原子核尺度的物理中去，因而大部分人忘记了引力坍缩的问题。但在20世纪60年代，现代技术的应用使得天文观测范围和数量大大增加，这将重新激发人们对天文学和宇宙学的大尺度问题的兴趣。奥本海默的工作被一些人重新发现并

推广。

现在，我们从奥本海默的工作中得到一幅这样的图像：恒星的引力场改变了光线在时空中的路径，使之和如果没有恒星情况下的路径不一样。光锥是表示闪光从其顶端发出后在时空中传播的路径。光锥在恒星表面附近稍微向内弯折。在日食时观察从遥远恒星发出的光线，可以看到这种偏折现象。随着恒星收缩，其表面的引力场变得更强大，而光锥向内偏折得更多。这使得光线从恒星逃逸变得更为困难，对于远处的观察者而言，光线变得更黯淡更红。最后，当恒星收缩到某一临界半径时，表面上的引力场变得如此之强，使得光锥向内偏折得这么厉害，以至于光线再也逃逸不出去（图6.1）。根据相对论，没有东西能行进得比光还快。这样，如果光都逃逸不出来，其他东西更不可能；所有东西都会被引力场拉回去。这样，存在一个事件的集合或时空区域，光或任何东西都不可能从该区域逃逸而到达远处的观察者。现在我们将这区域称作黑洞，将其边界称作事件视界，而它和刚好不能从黑洞逃逸的光线的那些路径相重合。

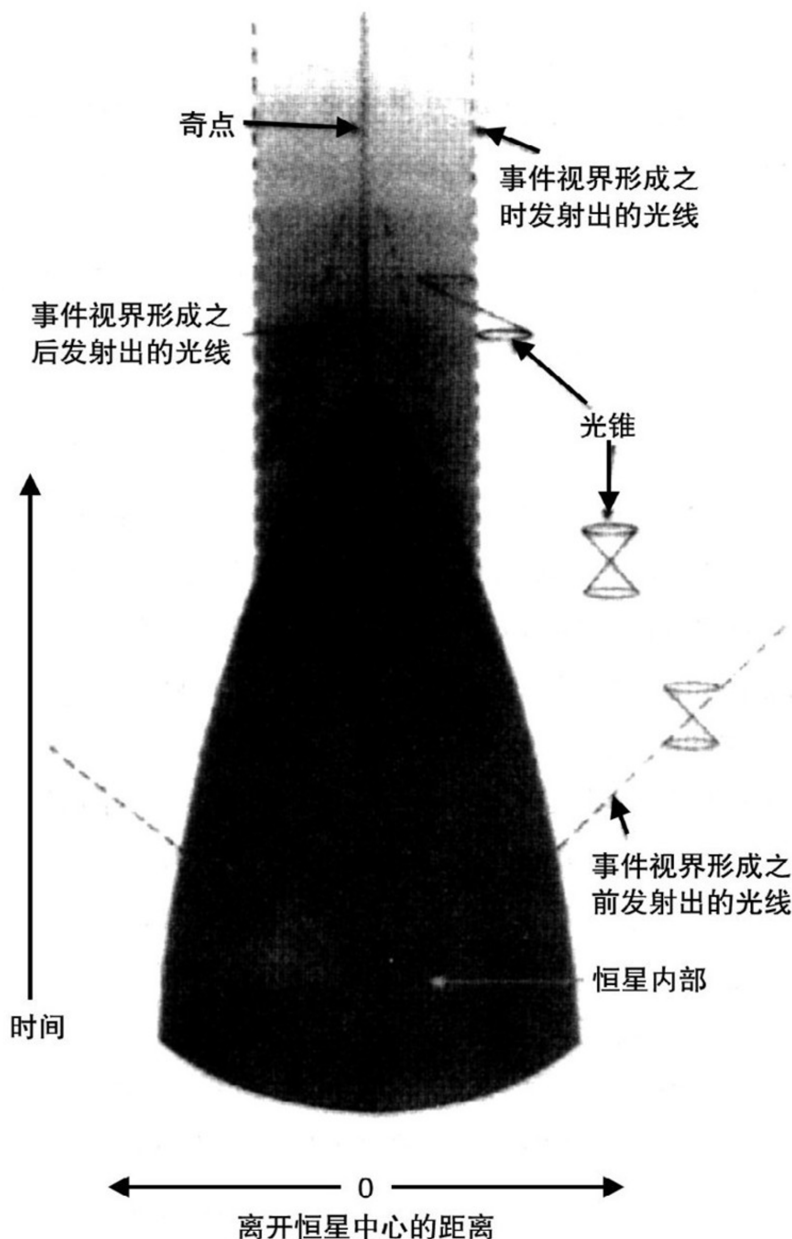


图6.1

如果你观察一个恒星坍缩并形成黑洞时，为了理解你所看到的情况，切记在相对论中没有绝对时间。每个观测者都有自己的时间测量。由于恒星的引力场，在恒星上某人的时间将和在远处某人的时间不同。假定在坍缩星表面有一无畏的航天员和恒星一起向内坍缩。他按照自己的表，每一秒钟发一信号到一个围绕着该恒星转动的航天飞船上去。在

他的表的某一时刻，譬如11点钟，恒星刚好收缩到它的临界半径以下，此时引力场强大到没有任何东西可以逃逸出去，他的信号再也不能传到航天飞船了。随着11点趋近，他的伙伴从航天飞船上观看会发现，从该航天员发来的一串信号的时间间隔越变越长。但是这个效应在10点59分59秒之前是非常微小的。在收到10点59分58秒和10点59分59秒发出的两个信号之间，他们只需等待比1秒钟稍长一点的时间，然而他们必须为11点发出的信号等待无限长的时间。按照航天员的手表，光波是在10点59分59秒和11点之间由恒星表面发出；从航天飞船上看，那光波被散开到无限长的时间间隔里。在航天飞船上这一串光波来临的时间间隔变得越来越长，所以从恒星来的光显得越来越红、越来越淡，最后，该恒星变得如此之朦胧，以至于从航天飞船上再也看不见它：所余下的一切只是空间中的一个黑洞。不过，此恒星继续以同样的引力作用到航天飞船上，使飞船继续围绕着形成的黑洞旋转。但是由于以下的问题，上述场景不是完全现实的。一个人离开恒星越远则引力越弱，所以作用在这位无畏的航天员脚上的引力总比作用到他头上的大。在恒星还未收缩到临界半径而形成事件视界之前，这力的差别就足以将我们的航天员拉成意大利面条那样，甚至将他撕裂！然而我们相信，在宇宙中存在大得多的天体，譬如星系的中心区域，它们遭受到引力坍缩而产生黑洞；一位在这样的物体上面的航天员在黑洞形成之前不会被撕开。事实上，当他到达临界半径时，不会有任何异样的感觉，甚至在通过永不回返的那一点时，都没注意到它。然而，随着这区域继续坍缩，只要在几个钟头之内，作用到他头上和脚上的引力之差会变得如此之大，以至于再将其撕裂。

罗杰·彭罗斯和我在1965年和1970年之间的研究指出，根据广义相对论，在黑洞中必然存在密度和时空曲率无限大的奇点。这和时间开端时的大爆炸相当类似，只不过它是一个坍缩物体和航天员的时间终点而已。在此奇点，科学定律和我们预言将来的能力都崩溃了。然而，任何留在黑洞之外的观察者，将不会受到可预见性失效的影响，因为从奇点出发的，不管是光还是任何其他信号，都不能到达他那儿。这个非凡的事实使得罗杰·彭罗斯提出了宇宙监督假想，它可以被意译为："上帝憎恶裸奇点。"换言之，由引力坍缩所产生的奇点只能发生在像黑洞这样的地方，它在那里被事件视界体面地遮住而不被外界看见。严格地讲，这就是所谓弱的宇宙监督假想：它使留在黑洞外面的观察者不至于受到发生在奇点处的可预见性崩溃的影响，但它对那位不幸落到黑洞里的可怜的航天员却是爱莫能助。

广义相对论方程存在一些解，我们的航天员在这些解中可能看到裸奇点：他也许能避免撞到奇点上去，相反地穿过一个“虫洞”来到宇宙的另一区域。看来这给在时空内的旅行提供了大的可能性。但是不幸的是，所有这些解似乎都是非常不稳定的；最小的干扰，譬如一个航天员的存在就会使之改变，以至于他还没能看到此奇点，就撞上去而终结了他的时间。换言之，奇点总发生在他的将来，而绝不会发生在他的过去。宇宙监督假想强的版本是说，在一个现实的解里，奇点总是要么整个存在于将来（如引力坍缩的奇点），要么整个存在于过去（如大爆炸）。我强烈地相信宇宙监督，这样我就和加州理工学院的基帕·索恩和约翰·普勒斯基尔打赌，认为它总是成立的。由于找到了一些解的例子，在非常远处可以看得见其奇点，所以我在技术的层面上输了。这样，我必须遵照协约还清赌债，也就是必须把他们的裸露遮盖住。但是我可以宣布道义上的胜利。这些裸奇点是不稳定的：最小的干扰就会导致这些奇点消失，或者躲到事件视界后面去。所以它们在实际情形下不会发生。

事件视界，也就是时空中不可逃逸区域的边界，其行为犹如围绕着黑洞的单向膜：物体，譬如粗心的航天员，能通过事件视界落到黑洞里去，但是没有任何东西可以通过事件视界而逃离黑洞。（记住事件视界是企图逃离黑洞的光在时空中的路径，而且没有任何东西可以比光行进得更快）。人们可以将诗人但丁针对地狱入口所说的话恰到好处地应用于事件视界：“从这里进去的人必须抛弃一切希望。”任何东西或任何人，一旦进入事件视界，就会很快地到达无限致密的区域和时间的终点。

广义相对论预言，运动的重物会导致引力波的辐射，那是以光的速度行进的空间曲率的涟漪。引力波和电磁场的涟漪光波相类似，但是要探测到它则困难得多。引力波引起邻近自由落体之间距离的非常微小的变化，由此可以观察到它。在美国、欧洲和日本正在建造一些检测器，将把10万亿亿（1后面跟21个0）分之一的位移，或者把在10英里距离中的比一个原子核还小的位移测量下来。

就像光一样，引力波带走了发射它们的物体的能量。因为任何运动中的能量都会被引力波的辐射带走，所以可以预料，一个大质量物体的系统最终会趋向于一种不变的状态。（这和扔一块软木到水中的情况相当类似：起先翻上翻下折腾了好一阵，但是随着涟漪将其能量带走，它

最终平静下来。）例如，围绕着太阳公转的地球即产生引力波。其能量损失的效应就要改变地球的轨道，使之逐渐越来越接近太阳，最后撞到太阳上，归于一种不变的状态。在地球和太阳的情形下，能量损失率非常小——大约只能点燃一个小电热器。这意味着要用大约1000亿亿亿年地球才会撞到太阳上，没有必要立即为之担忧！地球轨道改变极其缓慢，根本观测不到。但几年以前，在称为PSR1913＋16（PSR表示“脉冲星”，一种特别的发射出射电波规则脉冲的中子星）的系统中观测到这同一效应。此系统由两个相互围绕着公转的中子星组成，由于引力波辐射，它们的能量损失，使它们相互沿着螺旋线轨道靠近。J.H.泰勒和R.A.荷尔西由于对广义相对论的这一证实获得1993年的诺贝尔奖。大约3亿年后它们将会碰撞。它们在碰撞之前，将会公转得这么快速，发射出的引力波，足以让像LIGO这样的检测器接收到。

在恒星引力坍缩形成黑洞时，运动会快得多，这样携带走能量的速率就会高得多。因此不用太长的时间就会达到不变的状态。这最终的状态将会是怎样的呢？人们会以为，它将依赖于形成黑洞的恒星的所有复杂特征——不仅它的质量和转动速度，而且恒星不同部分的不同密度以及恒星内气体的复杂运动。而如果黑洞就像坍缩形成它们的原先物体那样变化多端，那么一般来讲，对黑洞作任何预言都会非常困难。

然而，加拿大科学家威纳·伊斯雷尔（他生于柏林，在南非长大，在爱尔兰得到博士学位）在1967年使黑洞研究发生了彻底的改变。伊斯雷尔指出，根据广义相对论，非旋转的黑洞必须是非常简单的；它们是完美的球形，其大小只依赖于它们的质量，并且任何两个这样的同质量的黑洞必须等同。事实上，它们可以用爱因斯坦的特解来描述，这个解是在广义相对论发现后不久的1917年被卡尔·施瓦兹席尔德找到的。起初许多人，其中包括伊斯雷尔本人，认为，既然黑洞必须是完美的球形，一个黑洞只能由一个完美球形物体坍缩形成。因此，任何实际的恒星——从来都不是完美的球形——只会坍缩形成一个裸奇点。

然而，对于伊斯雷尔的结果，一些人，特别是罗杰·彭罗斯和约翰·惠勒提倡一种不同的解释。他们论证道，牵涉恒星坍缩的快速运动表明，其释放出来的引力波使之越来越接近于球形，到它终结于静态的时刻，就变成准确的球形。按照这种观点，任何非旋转恒星，不管其形状和内部结构如何复杂，在引力坍缩之后都将终结于一个完美的球形黑洞，其大小只依赖于它的质量。这种观点得到进一步计算的支持，并且很快就

被大家接受。

伊斯雷尔的结果只处理了由非旋转物体形成的黑洞。1963年，新西兰人罗伊·克尔找到了广义相对论方程的描述旋转黑洞的一族解。这些“克尔”黑洞以恒常速度旋转，其大小与形状只依赖于它们的质量和旋转的速度。如果旋转为零，黑洞就是完美的球形，这解就和施瓦兹席尔德解一样。如果旋转不为零，黑洞在赤道附近就会鼓出去（正如地球或太阳由于旋转而鼓出去一样），而旋转得越快则鼓得越厉害。由此人们猜测，如将伊斯雷尔的结果推广到包括旋转物体的情形，则任何旋转物体坍缩形成黑洞后，将最后终结于由克尔解描述的一个稳态。

1970年，我在剑桥的一位同事和研究生同学布兰登·卡特为证明此猜测跨出了第一步。他指出，假定一个稳态的旋转黑洞，正如一个自旋的陀螺那样，有一个对称轴，则它的大小和形状，只由它的质量和旋转速度决定。然后我在1971年证明了，任何稳态的旋转黑洞确实有这样的一个对称轴。最后在1973年，在伦敦国王学院任教的大卫·罗宾逊利用卡特和我的结果证明了这猜测是对的：这样的黑洞确实必须是克尔解。这样，在引力坍缩之后，一个黑洞必须最终演变成一种能够旋转，但是不能搏动的态。此外，它的大小和形状，只决定于它的质量和旋转速度，而与坍缩形成黑洞的原先物体的性质无关。此结果因如下一句格言而众所周知：“黑洞没有毛。”“无毛”定理具有巨大的实际重要性，因为它极大地限制了黑洞的可能类型。因此，人们可以制造可能包含黑洞的对象的详细模型，再将此模型的预言和观测相比较。因为在黑洞形成之后，我们所能测量的只是有关坍缩物体的质量和旋转速度，所以“无毛”定理还意味着，有关这物体的非常大量的信息，在黑洞形成时损失了。下一章我们将会理解这个意义。

黑洞是科学史上极为罕见的情形之一，在没有任何观测到的证据说明其理论是正确的情形下，作为数学的模型被发展到非常详尽的地步。的确，这经常是黑洞反对者的主要论据：人们怎么能相信这样的物体，其仅有的证据是基于令人怀疑的广义相对论的计算呢？然而，1963年，加利福尼亚的帕罗玛天文台的天文学家马丁·施密特测量了在称为3C273（即是剑桥射电源编目第三类的273号）射电源方向的一个黯淡的类星体的红移。他发现引力场不可能引起这么大的红移——如果它是引力红移，这类星体质量必须这么大，并且离我们必须这么近，势必干扰太阳系中的行星轨道。这暗示这个红移是由宇宙的膨胀引起的，进而

表明此物体离我们非常遥远。由于在这么远的距离还能观察到，它必须非常亮，也就是必须辐射出大量的能量。人们会想到，产生这么大能量的唯一机制看来不仅是一个恒星，而是一个星系的整个中心区域的引力坍缩。人们还发现了许多其他相似的类星体，它们都有很大的红移。但是它们都离开我们太远了，所以对之进行观察太困难了，不能给黑洞提供结论性的证据。

1967年，剑桥的一位研究生约瑟琳·贝尔发现了天空发射出射电波的规则脉冲的物体，这对黑洞存在的预言带来了进一步的鼓舞。起初贝尔和她的导师安东尼·赫维许以为，他们可能和我们星系中的外星文明进行了接触！我清楚地记得在宣布他们发现的讨论会上，他们将这4个最早发现的源称为LGM1—LGM4，LGM表示“小绿人”（“Little Green Man”）的意思。然而，最终他们和其他所有人都得到了不那么浪漫的结论，这些被称为脉冲星的物体，事实上是旋转的中子星。因为它们的磁场和周围物质复杂地相互作用，这些中子星发出射电波的脉冲。这对于写空间探险的作者而言是个坏消息，但对于我们这些当时相信黑洞的少数人来说，是非常大的希望——这是中子星存在的第一个有力的证据。中子星的半径大约为10英里，只是恒星变成黑洞的临界半径的几倍。如果一颗恒星能坍缩到这么小的尺度，预料其他恒星能坍缩到更小的尺度而成为黑洞，就是理所当然的了。



图6.2　在靠近照片中心的两个恒星之中最亮的那颗是天鹅X-1，被认为是由互相绕着旋转的一个

按照黑洞定义，它不能发出光，我们何以希望能检测到它呢？这有点像在煤库里找黑猫。庆幸的是，有一种办法。正如约翰·米歇尔在他1783年的先驱性论文中指出的，黑洞仍然将它的引力作用到周围的物体上。天文学家观测了许多系统，在这些系统中，两颗恒星由于相互之间的引力吸引而相互围绕着运动。他们还观察到了这样的系统，其中只有一颗可见的恒星围绕着另一颗看不见的伴星运动。人们当然不能立即得出结论说，这伴星即为黑洞——它可能仅仅是一颗黯淡的看不见的恒星而已。然而，这种系统中的一些，像天鹅X-1的（图6.2）那样，也是强X射线源。对这现象的最好解释是，物质从可见星的表面被吹起来，当它落向不可见的伴星时，形成螺旋状运动（这和水从浴缸流出很相似），并且变得非常热，发出X射线（图6.3）。为了使这机制起作用，不可见物体必须非常小，像白矮星、中子星或黑洞那样。通过观测那颗可见星的轨道，人们可以确定不可见物体的最小的可能质量。在天鹅X-1的情形，这大约是太阳质量的6倍。按照钱德拉塞卡的结果，它的质量太大了，既不可能是白矮星，也不可能是中子星。因此，看来它只能是一个黑洞。

还有其他不包含黑洞的解释天鹅X-1的模型，但是所有这些都相当牵强附会。黑洞看来是对该观测的仅有的真正自然的解释。尽管如此，我和加州理工学院的基普·S.索恩打赌说，天鹅X-1不包含一个黑洞！这对我而言是一种保险的形式。我对黑洞作了许多研究，如果发现黑洞不存在，而这一切都成为徒劳。但在这种情形下，我将得到赢得打赌的安慰，他要给我订阅4年的《私家侦探》杂志。事实上，从我们打赌的1975年迄今，虽然天鹅X-1的情形并没有改变太多，但是人们已经积累了这么多对黑洞有利的其他观测证据，我只好认输。我进行了约定的赔偿，那就是给索恩订阅一年的《藏春阁》，这使他开放的妻子相当恼火。

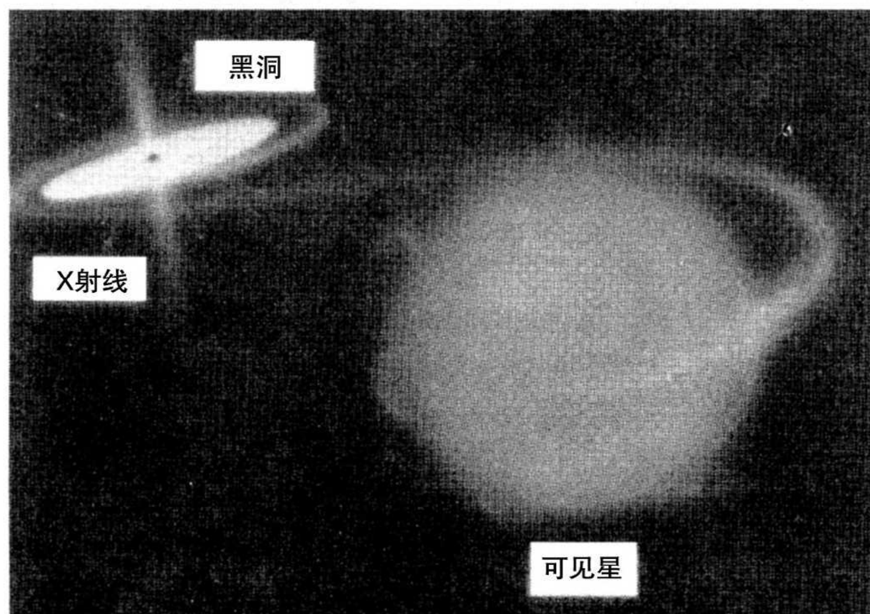


图6.3

现在，在像我们的星系和两个名叫麦哲伦星云的邻近星系的系统中，我们还有几个类似天鹅X-1的黑洞的证据。然而，几乎可以肯定，黑洞的数量比这多得太多了！在宇宙的漫长历史中，很多恒星肯定烧尽了它们的核燃料并坍缩了。黑洞的数目甚至比可见恒星的数目要大得多。仅仅在我们的星系中，大约总共有1000亿颗可见恒星。这样巨大数量的黑洞的额外引力就能解释为何目前我们的星系以现有的速率转动：仅用可见恒星的质量是不足以说明这一点的。我们还有某些证据表明，在我们星系的中心有一个大得多的黑洞，其质量大约是太阳的10万倍。星系中的恒星若十分靠近这个黑洞时，作用在它的近端和远端上的引力之差或潮汐力会将其撕开。它们的遗骸以及摆脱其他恒星的气体将落到黑洞上去。正如在天鹅X-1的情形那样，气体将以螺旋形轨道向里运动，并且被加热，虽然没有到那种程度。它没有热到足以发出X射线，但是它可以用来说明在星系中心观测到的非常致密的射电波和红外线源。

人们认为，在类星体的中心是类似的，但质量更大的黑洞，其质量大约为太阳的1亿倍。例如，用哈勃望远镜对称为M87的星系进行的观测揭示出，它含有直径130光年的气体盘，该盘围绕着20亿倍太阳质量的中心物体旋转。这只能是一个黑洞。只有落入此超重的黑洞的物质才

能提供足够强大的能源，用以解释这些物体释放出的巨大能量。当物质旋入黑洞，它将使黑洞往同一方向旋转，使黑洞产生一个磁场，这个磁场和地球的磁场颇为相像。落入的物质会在黑洞附近产生能量非常高的粒子。该磁场是如此之强，能将这些粒子聚焦成沿着黑洞旋转轴，也即在它的北极和南极方向往外喷射的射流。在许多星系和类星体中确实观察到这类射流。人们还可以考虑存在质量比太阳质量小很多的黑洞的可能性。因为它们的质量比钱德拉塞卡极限低，所以不能由引力坍缩产生：这样小质量的恒星，甚至在耗尽了自己的核燃料之后，还能支持自己对抗引力。只有当物质由非常巨大的外界压力压缩成极端紧密的状态时，才能形成小质量的黑洞。一个巨大的氢弹可提供这样的条件：物理学家约翰·惠勒曾经计算过，如果将世界海洋里所有的重水制成一个氢弹，则它可以将中心的物质压缩到产生一个黑洞。（当然，那时没有一个人能残留下来观察它！）比较实在的一种可能性是：在极早期宇宙的高温和高压条件下可能产生这样小质量的黑洞。因为只有一个比平均值更紧密的小区域，才能以这样的方式被压缩形成一个黑洞，所以只有当早期宇宙不是完全光滑的和均匀时，这才有可能形成黑洞。但是我们知道，早期宇宙一定存在一些无规性，否则现在宇宙中的物质分布仍然会是完全均匀的，而不能结块形成恒星和星系。

很清楚，为了说明恒星和星系的无规性是否导致形成相当数目的“太初”黑洞，须依赖于早期宇宙中条件的细节。这样，如果我们能够确定现在有多少太初黑洞，我们就能对宇宙的极早期阶段了解很多。质量大于10亿吨（一座大山的质量）的太初黑洞，只能通过它们对其他可见物质或宇宙膨胀的影响被探测到。然而，正如我们将要在下一章看到的，黑洞毕竟不是真黑：它们像一个热体一样发热发光，它们越小则发热发光得越厉害。所以，看起来荒谬，而事实上却是，也许小的黑洞可以比大的黑洞更容易探测到！

第7章　黑洞不是这么黑的

在1970年以前，我关于广义相对论的研究，主要集中于是否存在一个大爆炸奇点。然而，同年11月我的女儿露西出生后不久的一个晚上，当我上床时，开始思考黑洞的问题。我的残废使得这个过程相当缓慢，这样我有大量时间。那时候还不存在关于时空的那些点是在黑洞之内还是在黑洞之外的准确定义。我已经和罗杰·彭罗斯讨论过将黑洞定义为不能逃逸到远处的事件集合的想法，这也就是现在被广泛接受的定义。它意味着，黑洞边界——即事件视界——是由刚好不能从黑洞逃逸，而只在边缘上永远盘旋的光线在时空里的路径形成的（图7.1）。这有点像从警察那里逃开，但是仅仅维持比警察快一步，而不能彻底逃脱的情景！

我忽然意识到，这些光线的路径永远不可能相互靠近。如果它们靠近，它们最终就必定相撞。这正如和另一个往相反方向逃离警察的人相遇一样——你们俩都会被抓住（或者，在这种情形下落到黑洞中去）。但是，如果这些光线被黑洞吞没，那它们就从未在黑洞的边界上呆过。所以在事件视界上的光线的路径必须永远相互平行运动或相互散开。另一种看到这一点的方法是，事件视界，亦即黑洞边界，正像一个影子的边缘——一个即将临头的灾难的影子。如果你看到在远距离上的一个源，譬如太阳，投下的影子，就能明白边缘上的光线不会相互靠近。

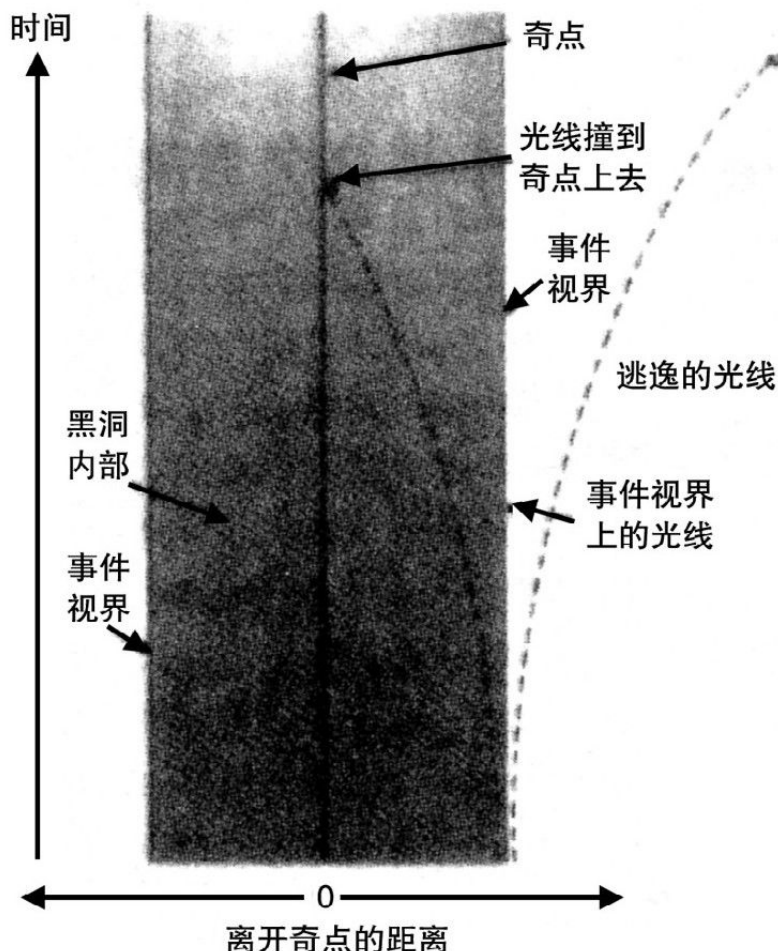


图7.1

如果从事件视界（亦即黑洞边界）来的光线永不相互靠近，则事件视界的面积可以保持不变或者随时间增大，但它永远不会减小——因为这意味着至少边界上的一些光线必须互相靠近。事实上，每当物质或辐射落到黑洞中去，这面积就会增大（图7.2）；或者如果两个黑洞碰撞并合并成一个单独的黑洞，这最后的黑洞的事件视界面积就会大于或等于原先黑洞事件视界面积的总和（图7.3）。事件视界面积的非减性质给黑洞的可能行为加上了重要的限制。我为我的发现如此激动，以至于当夜没睡多少。第二天，我给罗杰·彭罗斯打电话，他同意我的结果。我想，事实上他此前已经意识到了这个面积的性质。然而，他使用了稍微不同的黑洞定义。他没有意识到，假定黑洞已经终止于不随时间变化的状态，按照这两种定义，黑洞的边界与其面积都应是一样的。

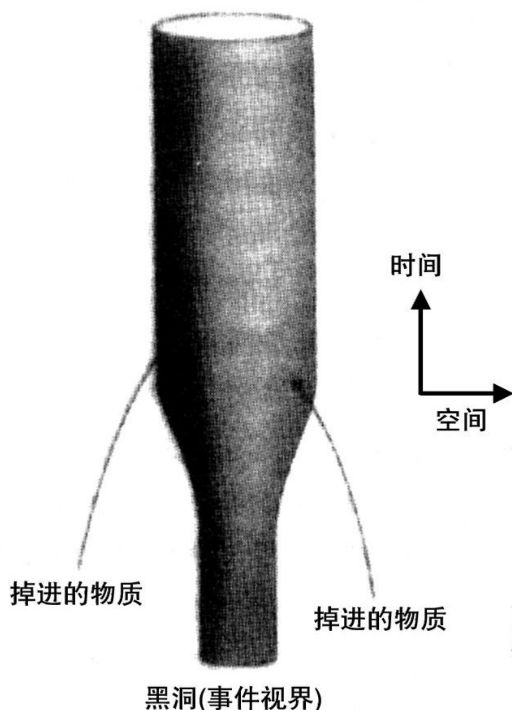


图7.2

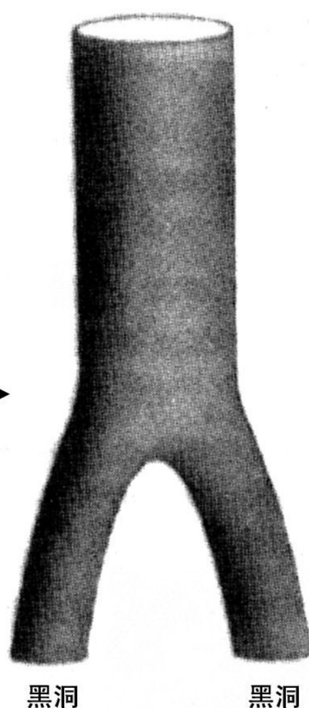


图7.3

人们非常容易从黑洞面积的非减行为联想起被叫作熵的物理量的行为。熵是测量一个系统的无序程度的物理量。常识告诉我们，如果不进行外部干涉，事物总是倾向于增加它的无序度。（你只要停止保养房子就会看到这一点！）人们可以从无序中创造出有序来（例如你可以油漆房子），但是必须消耗精力或能量，这样减少了可利用的有序能量的数量。

热力学第二定律是这个观念的一个准确描述。它陈述道：一个孤立系统的熵总是增加的，并且将两个系统连接在一起时，其合并系统的熵大于所有单独系统熵的总和。譬如，考虑一盒气体分子的系统。分子可以认为是不断相互碰撞，并不断从盒子壁反弹回来的康乐球。气体的温度越高，分子运动得越快，这样它们撞击盒壁越频繁也越厉害，而且它们作用到壁上的向外的压力越大。假定初始时所有分子被一隔板限制在盒子的左半部。如果接着将隔板除去，这些分子将趋向散开并充满盒子的两半。在以后的某一时刻，所有这些分子偶尔会都待在右半部或回到左半部，但占绝对优势的可能性是，分子的数目在左右两半大致相同。

这种状态比原先的所有分子都在一个半部的状态更加无序。因此，人们说气体的熵增加了。类似地，假定我们从两个盒子开始，将一个盒子充满氧分子，另一个盒子充满氮分子。如果把两个盒子连在一起并移去中间的壁，则氧分子和氮分子就开始混合。在后来的时刻，最可能的状态是两个盒子都充满了相当均匀的氧分子和氮分子的混合物。这种状态比原先分开的两盒的初始状态更无序，即具有更大的熵。

和其他科学定律，譬如牛顿引力定律相比，热力学第二定律的状况相对不同。例如，它只是在绝大多数的而非所有情形下成立。在以后某一时刻，我们第一个盒子中的所有气体分子在盒子的一半被发现的概率只有几万亿分之一，但它们可能发生。然而，如果附近有一黑洞，似乎存在一种非常容易的方法违反第二定律：只要将一些具有大量熵的物体，譬如一盒气体，抛进黑洞里。黑洞之外物体的总熵就会减少。当然，人们仍然可以说，包括黑洞里的熵的总熵没有降低——但是由于没有办法看到黑洞里面，我们无法知道里面物体的熵为多少。如果黑洞具有某一特征，黑洞外的观察者因之可知道它的熵，并且只要携带熵的物体一落入黑洞，它就会增加，那将是很美妙的。紧接着上述的黑洞面积定理的发现，即只要物体落入黑洞，它的事件视界面积就会增加，普林斯顿大学一位名叫雅可布·柏肯斯坦的研究生提出，事件视界的面积即是黑洞熵的量度。由于携带熵的物质落到黑洞中时，它的事件视界的面积会增加，这样就使黑洞外物质的熵和事件视界面积的和永远不会降低。

看来在大多数情况下，这个建议防止热力学第二定律受到违背。然而还有一个致命的瑕疵。如果一个黑洞具有熵，那它也应该有温度。但具有特定温度的物体必须以一定的速率发出辐射。从日常经验知道：只要将火钳在火上加热，它就会发光发热，发出辐射。但在低温下物体也发出辐射；只是因为辐射量相当小，在通常情况下没有注意到。为了防止违反热力学第二定律，这个辐射是必需的。所以黑洞必须发出辐射。但正是按照其定义，黑洞被认为是不发出任何东西的物体。因此，黑洞的事件视界的面积似乎不能认为是它的熵。1972年，我和布兰登·卡特以及美国同事詹姆·巴丁合写了一篇论文，在论文中我们指出，虽然在熵和事件视界的面积之间存在许多相似点，但还存在着这个致命的困难。我必须承认，写此文章的部分动机是因为被柏肯斯坦激怒，我觉得他滥用了我的事件视界面积增加的发现。然而，最后发现，他基本上还是正确的，虽然是在一种他肯定没有预料到的情形下。

1973年9月我访问莫斯科时，和苏联两位最主要的专家雅可夫·捷尔多维奇和亚历山大·斯塔拉宾斯基讨论黑洞问题。他们说服我，按照量子力学不确定性原理，旋转黑洞应该产生并辐射粒子。在物理学的基础上，我相信他们的论点，但是不喜欢他们计算辐射所用的数学方法。因此，我着手设计一种更好的数学处理方法，并于1973年11月底在牛津的一次非正式讨论会上将其公布于众。那时我还没计算出实际上有多少辐射。我预料要发现的正是捷尔多维奇和斯塔拉宾斯基预言的从旋转黑洞发出的辐射。然而，当我做了计算，使我既惊奇又恼火的是，我发现甚至非旋转黑洞显然也应以不变速率产生和发射粒子。起初我以为这种辐射表明我使用的一种近似无效。我担心如果柏肯斯坦发现了这个情况，他就一定会用它去进一步支持他关于黑洞熵的思想，而我仍然不喜欢这种思想。然而，我越仔细推敲，越觉得这近似其实应该有效。但是，最后使我信服这辐射是真实的理由是，这辐射的粒子谱刚好是一个热体辐射的谱，而且黑洞以刚好防止第二定律被违反的正确速率发射粒子。此后，其他人用多种不同的形式重复了这个计算。他们所有人都证实了黑洞必须如同一个热体那样发射粒子和辐射，其温度只依赖于黑洞的质量——质量越大则温度越低。

我们知道，任何东西都不能从黑洞的事件视界之内逃逸出来，黑洞怎么可能发射粒子呢？量子理论给我们的回答是，粒子不是从黑洞里面出来的，而是从紧靠黑洞的事件视界的外面的“空虚的”空间来的！我们可以用以下的方法去理解这个：我们以为是“空虚的”空间不能是完全空的，因为那就意味着诸如引力场和电磁场的所有场都必须刚好是零。然而场的数值和它的时间变化率如同粒子的位置和速度那样：不确定性原理意味着，人们对其中的一个量知道得越准确，则对另一个量知道得越不准确。所以在空虚的空间里场不可能严格地被固定为零，因为那样它就既有准确的值（零）又有准确的变化率（也是零）。场的值必须有一定的最小的不确定性量或量子起伏。人们可以将这些起伏理解为光或引力的粒子对，它们在某一时刻同时出现，相互离开，然后又相互靠近，而且相互湮灭。这些粒子正如同携带太阳引力的虚粒子：它们不像真的粒子那样，能用粒子探测器直接观察到。然而，它们的间接效应，例如原子中的电子轨道能量发生的微小变化，可被测量出，并和理论预言一致的程度，令人十分惊讶。不确定性原理还预言了存在类似的虚的物质粒子对，例如电子对和夸克对。然而在这种情形下，粒子对的一个成员为粒子，而另一成员为反粒子（光和引力的反粒子和粒子相同）。

因为能量不能无中生有，所以粒子反粒子对中的一个伴侣具有正能量，而另一个具有负能量。由于在正常情况下实粒子总是具有正能量，所以具有负能量的那一个粒子注定是短命的虚粒子。因此，它必须找到它的伴侣并与之相互湮灭。然而，因为实粒子要花费能量抵抗大质量物体的引力吸引才能将其推到远处，一颗实粒子的能量在接近大质量物体时比在远离时更小。正常情况下，这粒子的能量仍然是正的。但是黑洞里的引力是如此之强，甚至在那里实粒子的能量都可以是负的。因此，如果存在黑洞，带有负能量的虚粒子落到黑洞里可能变成实粒子或实反粒子。这种情形下，它不再需要和它的伴侣相互湮灭了。它被抛弃的伴侣也可以落到黑洞中去。或者由于它具有正能量，也可以作为实粒子或实反粒子从黑洞的邻近逃走（图7.4）。对于一个远处的观察者而言，它就显得是从黑洞发射出来的粒子一样。黑洞越小，负能粒子在变成实粒子之前必须走的距离越短，这样黑洞发射率和表观温度也就越大。

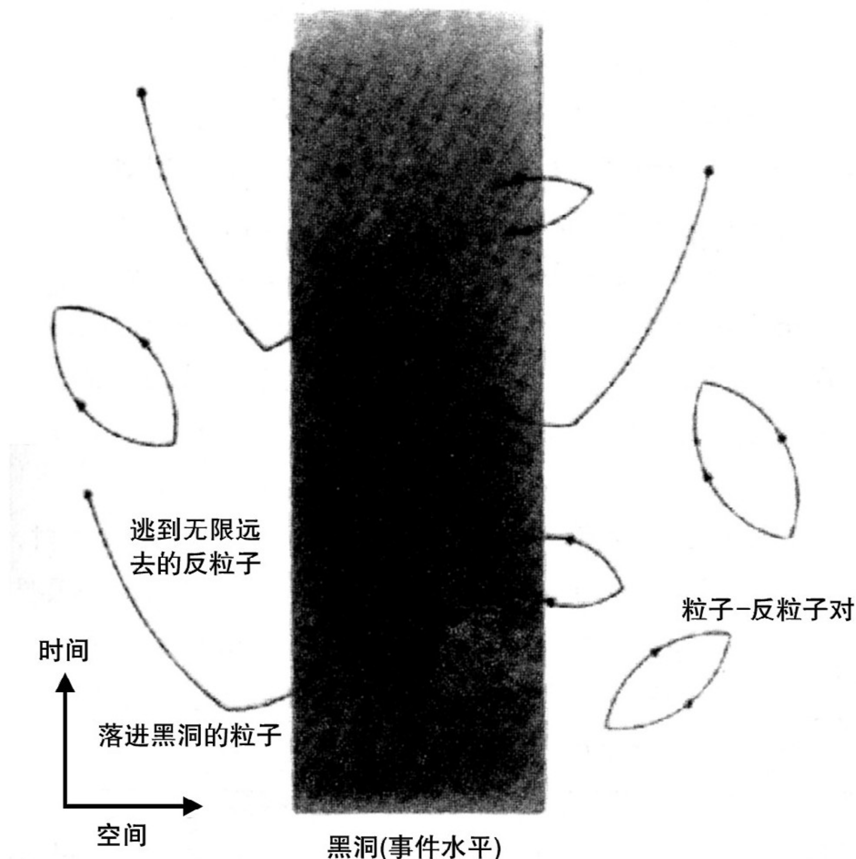


图7.4

辐射出去的正能量会被落入黑洞的负能粒子流平衡。按照爱因斯坦方程$E=mc^2$（E是能量，m是质量，c为光速），能量和质量成正比。因此，往黑洞去的负能量流减小它的质量。随着黑洞损失质量，它的事件视界面积变得更小，但是它发射出的辐射的熵过量地补偿了黑洞的熵的减少，所以第二定律从未被违反过。

还有，黑洞的质量越小，其温度就越高。这样，随着黑洞损失质量，它的温度和发射率增加，因而它的质量损失得更快。当黑洞的质量最后变得极小时会发生什么，人们并不很清楚。但是最合理的猜想是，它最终将会在一次巨大的，相当于几百万颗氢弹爆炸的发射暴中消失殆尽。

一个具有几倍太阳质量的黑洞只具有一千万分之一度的绝对温度。这比充满宇宙的微波辐射的温度（大约2.7K）要低得多，所以这种黑洞的辐射比它吸收的还要少。如果宇宙注定继续永远膨胀下去，微波辐射的温度就会最终减小到比这黑洞的温度还低，它就开始损失质量。但是即使到了那时候，它的温度是如此之低，以至于要用100亿亿亿亿亿亿亿亿（1后面跟66个0）年才全部蒸发完。这比宇宙的年龄长得多了，宇宙的年龄大约只有100亿至200亿（1或2后面跟10个0）年。另一方面，正如第6章提及的，在宇宙的极早期阶段存在由于无规性引起的坍缩而形成的质量极小的太初黑洞。这样的小黑洞会有高得多的温度，并以大得多的速率发出辐射。具有10亿吨初始质量的太初黑洞的寿命大体和宇宙的年龄相同。初始质量比这小的太初黑洞应该已蒸发完毕，但那些比这稍大的黑洞仍在辐射出X射线以及伽马射线。这些X射线和伽马射线像光波，只是波长短得多。这样的黑洞几乎不配这“黑”的绰号：它们实际上是白热的，正以大约1万兆瓦的功率发射能量。

一个这样的黑洞可以开动10个大型的发电站，只要我们能够驾驭黑洞的功率就好了。然而，这是非常困难的：这黑洞把和一座山差不多的质量压缩成比万亿分之一英寸，亦即一个原子核的尺度还小！如果你在地球表面上有这样的一个黑洞，就无法阻止它透过地面落到地球的中心。它会穿过地球而来回振动，直到最后停在地球的中心。所以仅有的放置黑洞并利用之发射出能量的地方是围绕着地球的轨道，而仅有的使它围绕地球公转的办法是，用放在它之前的一个大质量的吸引力去拖它，这和在驴子前面放一根胡萝卜颇为相像。至少在最近的将来，这个设想并不现实。

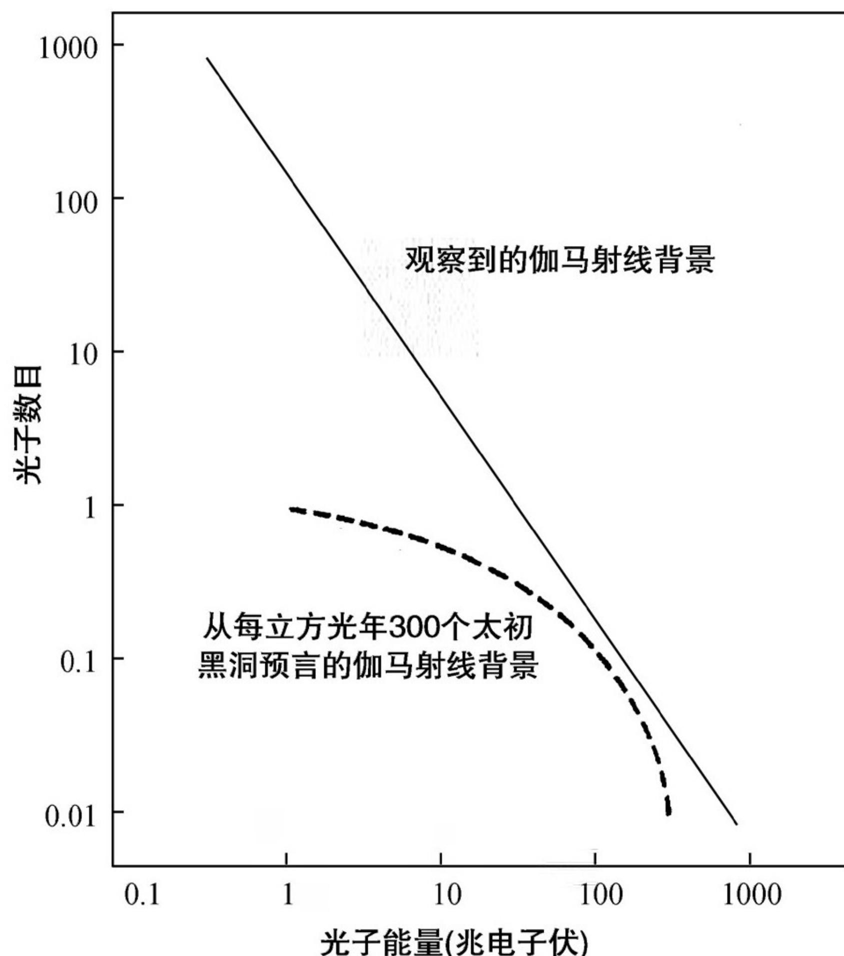


图7.5

但是，即使我们不能驾驭来自这些太初黑洞的辐射，我们观测到它们的机遇又如何呢？我们可以寻找太初黑洞在其主要生存期里发出的伽马射线辐射。虽然大部分黑洞在很远以外的地方，从它们来的辐射非常弱，但是从它们全体来的总辐射是可以检测得到的。我们确实观察到这样的一个伽马射线背景：图7.5表示观察到的强度随频率（每秒波动的次数）的变化。然而，这个背景可以，并且大概是由除了太初黑洞以外的过程产生的。图7.5中的点线指出，如果每立方光年平均有300个太初黑洞，它们所发射的伽马射线的强度应如何随频率变化。因此可以说，伽马射线背景的观测并没给太初黑洞提供任何肯定的证据。但它们明确告诉我们，在宇宙中平均每立方光年不可能有多于300个太初黑洞。这个极限表明，太初黑洞最多只能构成宇宙中一百万分之一的物质。

由于太初黑洞是如此稀罕，似乎不太可能存在一个近到我们可以将其当作一个单独的伽马射线源来观察的黑洞。但是由于引力会将太初黑洞往任何物体处拉近，所以它们在星系里面和附近应该会更稠密得多。虽然伽马射线背景告诉我们，平均每立方光年不可能有多于300个太初黑洞，但它并没有告诉我们，太初黑洞在我们星系中有多么普遍。譬如讲，如果它们的密度比这个普遍100万倍，则离开我们最近的黑洞可能大约在10亿千米远，或者大约是已知的最远的行星——冥王星那么远。在这个距离上去探测黑洞恒定的辐射，即使其功率为1万兆瓦，仍是非常困难的。为了观测到一个太初黑洞，人们必须在合理的时间间隔里，譬如一星期，从同方向检测到几个伽马射线量子。否则，它们仅可能是背景的一部分。因为伽马射线有非常高的频率，从普朗克量子原理得知，每一伽马射线量子都具有非常高的能量，这样甚至辐射1万兆瓦都不需要许多量子。而要观测到从冥王星这么远来的这些稀少的粒子，需要一个比任何迄今已经建造的更大的伽马射线探测器。况且，由于伽马射线不能穿透大气层，此探测器必须放置到太空。

当然，如果一颗像冥王星这么近的黑洞已达到它生命的末期并要爆炸开来，很容易检测其最后辐射暴。但是，如果一个黑洞已经辐射了100亿至200亿年，不在过去或将来的几百万年里，而是在未来的若干年里到达它生命终点的可能性真是微不足道！所以在你的研究津贴用光之前，为了有一合理的机会看到爆炸，必须找到在大约1光年距离之内检测任何爆炸的方法。事实上，原先建造来监督违反禁止核试验条约的卫星检测到了从太空来的伽马射线暴。这些每个月似乎发生16次左右，并且大体均匀地分布在天空的所有方向上。这表明它们起源于太阳系之外，否则的话，我们可以预料它们要集中于行星轨道面上。这种均匀分布还表明，这些伽马射线源要么处于银河系中离我们相当近的地方，要么就在它的外围的宇宙学距离之处，因为否则的话，它们又会集中于星系的平面附近。在后者的情形下，产生伽马射线暴所需的能量实在太大，微小的黑洞根本提供不起。但是如果这些源以星系的尺度衡量和我们邻近，那就可能是正在爆发的黑洞。我非常希望这种情形成真，但是我必须承认，还可以用其他方式来解释伽马射线暴，例如中子星的碰撞。未来几年的新观测，尤其是像LIGO这样的引力波探测器，应该能使我们发现伽马射线暴的起源。

即使对太初黑洞的寻求证明是否定的，看来可能会是这样，仍然给了我们关于极早期宇宙的重要信息。如果早期宇宙曾经是混沌或不规则

的，或者如果物质的压力曾经很低，可以预料到会产生比我们由观测伽马射线背景设下的极限更多得多的太初黑洞。只有当早期宇宙是非常光滑和均匀的，并有很高的压力，人们才能解释为何没有可观数目的太初黑洞。

黑洞辐射的思想是这种预言的第一例，它以基本的方式依赖于20世纪两个伟大理论，即广义相对论和量子力学。因为它推翻了已有的观点，所以一开始就引起了许多反对："黑洞怎么能辐射东西？"当我在牛津附近的卢瑟福—阿普顿实验室的一次会议上，第一次宣布我的计算结果时，受到了普遍质疑。我讲演结束后，会议主席伦敦国王学院的约翰·泰勒宣布这一切都是毫无意义的。他甚至为此还写了一篇论文。然而，最终包括约翰·泰勒在内的大部分人都得出结论：如果我们关于广义相对论和量子力学的其他观念是正确的，那么黑洞必须像热体那样辐射。这样，即使我们还不能找到一个太初黑洞，大家相当普遍地同意，如果找到的话，它必须正在发射出大量的伽马射线和X射线。

黑洞辐射的存在似乎意味着，引力坍缩不像我们曾经认为的那样是最终的、不可逆转的。如果一个航天员落到黑洞中去，黑洞的质量将增加，但是最终这额外质量的等效能量将会以辐射的形式回到宇宙中去。这样，此航天员在某种意义上被"再循环"了。然而，这是一种非常可怜的不朽，因为当航天员在黑洞里被撕开时，他的任何个人的时间的概念几乎肯定都达到了终点！甚至最终从黑洞辐射出来的粒子的种类，一般来说都和构成这航天员的不同：这航天员所遗留下来的仅有特征是他的质量或能量。

当黑洞的质量大于几分之一克时，我用以推导黑洞辐射的近似应是很有效的。但是，当黑洞在它的生命晚期，质量变成非常小时，这近似就失效了。最可能的结果看来是，它至少从宇宙的我们这一区域消失了，带走了航天员和可能在它里面的任何奇点（如果其中确有一个奇点的话）。这是量子力学能够去掉广义相对论预言的奇点的第一个迹象。然而，我和其他人在1974年使用的方法不能回答诸如在量子引力理论中是否会发生奇性的问题。因此，从1975年以来，根据理查德·费恩曼对于历史求和的思想，我开始推导一种更强有力的量子引力论方法。这种方法对宇宙以及其诸如航天员之类的内容的开端和终结给出的答案，将在以下两章叙述。我们将会看到，虽然不确定性原理对于我们所有的预言的准确性都加上了限制，同时它却可以排除掉发生在时空奇点处的基本

的不可预言性。

第8章　宇宙的起源和命运

从爱因斯坦广义相对论本身就能预言：时空在大爆炸奇点处开始，并会在大挤压奇点处（如果整个宇宙坍缩的话）或在黑洞中的一个奇点处（如果一个局部区域，譬如恒星坍缩的话）结束。任何落进黑洞的东西都会在奇点处毁灭，在外面只能继续感觉到它的质量的引力效应。另一方面，当考虑量子效应时，物体的质量和能量似乎会最终回到宇宙的其余部分，黑洞和在它当中的任何奇点会一道蒸发掉并最终消失。量子力学对大爆炸和大挤压奇点也能有同等戏剧性的效应吗？在宇宙的极早或极晚期，当引力场如此之强，量子效应不能不考虑时，究竟会发生什么？宇宙究竟是否有一个开端或终结？如果有的话，它们是什么样子的？

我在整个20世纪70年代主要研究黑洞，但在1981年参加在梵帝冈由耶稣会组织的宇宙学会议时，我对于宇宙的起源和命运问题的兴趣被重新唤起。当天主教会试图对科学的问题发号施令，并宣布太阳围绕着地球运动时，对伽利略犯下了严重的错误。几个世纪后的现在，它决定邀请一些专家做宇宙学问题的顾问。在会议的尾声，教皇接见所有与会者。他告诉我们，在大爆炸之后的宇宙演化是可以研究的，但是我们不应该去过问大爆炸本身，因为那是创生的时刻，因而只能是上帝的事务。我心中窃喜，看来他并不知道，我刚在会议上作过的演讲的主题——时空有限而无界的可能性，这意味着它没有开端、没有创生的时刻。我不想去分享伽利略的厄运。我对伽利略之所以有一种强烈的认同感，其部分原因是我刚好出生于他死后的300年！

为了解释我和其他人关于量子力学如何影响宇宙的起源和命运的思想，必须首先按照所谓的“热大爆炸模型”来理解被广泛接受的宇宙历史。它是假定从早到大爆炸时刻起宇宙就可用弗里德曼模型来描述。在此模型中，人们发现当宇宙膨胀时，其中的任何物体或辐射都变得更凉（当宇宙的尺度大到2倍，它的温度就降低到一半）。由于温度即是粒子的平均能量——或速度的测度，宇宙的变凉对于其中的物质就会有较大的效应。在非常高的温度下，粒子能够运动得如此之快，可以逃脱任何由核力或电磁力将它们吸引在一起的作用。但是可以预料到，随着它们冷却下来，粒子相互吸引并且开始结块。更有甚者，连存在于宇宙中

的粒子种类也依赖于温度。在足够高的温度下，粒子的能量是如此之高，只要它们碰撞就会产生很多不同的粒子/反粒子对——并且，虽然其中一些粒子打到反粒子上去时会湮灭，但是它们产生得比湮灭得更快。然而，在更低的温度下，碰撞粒子具有较小的能量，粒子/反粒子对产生得不快——而湮灭则变得比产生更快。

就在大爆炸时，宇宙体积被认为是零，所以是无限热。但是，辐射的温度随着宇宙的膨胀而降低。大爆炸后的1秒钟，温度降低到约为100亿度，这大约是太阳中心温度的1000倍，亦即氢弹爆炸达到的温度。此刻宇宙主要包含光子、电子和中微子（极轻的粒子，它只受弱力和引力的作用）和它们的反粒子，还有一些质子和中子。随着宇宙的继续膨胀，温度继续降低，电子/反电子对在碰撞中的产生率就落到它们的湮灭率之下。这样，大多数电子和反电子相互湮灭掉了，产生出更多的光子，只剩下很少的电子。然而，中微子和反中微子并没有相互湮灭掉，因为这些粒子和它们自己以及其他粒子的作用非常微弱。这样，直到今天它们应该仍然存在。如果我们能观测到它们，就会为非常热的早期宇宙阶段的图象提供一个很好的检验。可惜现在它们的能量太低了，使得我们不能直接观察到。然而，如果中微子不是零质量，而是像近年的一些实验暗示的，自身具有小的质量，我们则可能间接地探测到它们：正如前面提到的那样，它们可以是“暗物质”的一种形式，具有足够的引力吸引去遏止宇宙的膨胀，并使之重新坍缩。

在大爆炸后的大约100秒，温度降到了10亿度，也即最热的恒星内部的温度。在此温度下，质子和中子不再有足够的能量逃脱强核力的吸引，所以开始结合产生氘（重氢）的原子核。氘核包含一个质子和一个中子。然后，氘核和更多的质子、中子相结合形成氦核，它包含两个质子和两个中子，还产生了少量的两种更重的元素锂和铍。可以计算出，在热大爆炸模型中大约1/4的质子和中子变成了氦核，还有少量的重氢和其他元素。余下的中子会衰变成质子，这正是通常氢原子的核。

1948年，科学家乔治·伽莫夫和他的学生拉夫·阿尔法在一篇著名的合作的论文中，第一次提出了宇宙的热的早期阶段的图象。伽莫夫颇为幽默——他说服了核物理学家汉斯·贝特将他的名字加到这论文上面，使得列名作者为“阿尔法、贝特、伽莫夫”，正如最前面三个希腊字母：阿尔法、贝他、伽马（α，β，γ）：这特别适合于一篇关于宇宙开初的论文！他们在此论文中作出了一个惊人的预言：宇宙的热的早期阶段的辐

射（以光子的形式）今天还应该在周围存在，但是其温度已被降低到只比绝对零度（-273℃）高几度。这正是彭齐亚斯和威尔逊在1965年发现的辐射。在阿尔法、贝特和伽莫夫写此论文时，对于质子和中子的核反应了解得不多，所以对于早期宇宙不同元素比例所作的预言相当不准确；但是，在用更好的知识重新进行这些计算之后，现在的结果已和我们的观测符合得非常好。况且，在解释宇宙为何应该有这么多氦时，用任何其他方法都是非常困难的。所以，我们相当确信，至少一直回溯到大爆炸后大约1秒钟为止，这个图象是正确无误的。

大爆炸后的几个钟头之内，氦和其他元素的产生就停止了。之后的100万年左右，宇宙仅仅是继续膨胀，没有发生什么事。最后，一旦温度降低到几千度，电子和核子不再有足够能量去战胜它们之间的电磁吸引力，就开始结合形成原子。宇宙作为整体，继续膨胀变冷，但在一个比平均稍微密集些的区域，膨胀就会由于额外的引力吸引而缓慢下来。在一些区域膨胀最终会停止并开始坍缩。当它们坍缩时，在这些区域外的物体的引力拉力使它们开始很慢地旋转；当坍缩的区域变得更小，它会自转得更快——正如在冰上自转的滑冰者，缩回手臂时会自转得更快。最终，当区域变得足够小，它自转得快到足以平衡引力的吸引，碟状的旋转星系就以这种方式诞生了。另外一些区域刚好没有得到旋转，就形成了叫作椭圆星系的椭球状物体。这些区域之所以停止坍缩，是因为星系的个别部分稳定地围绕着它的中心公转，但星系整体并没有旋转。

随着时间流逝，星系中的氢和氦气体被分割成更小的星云，它们在自身引力下坍缩。当它们收缩时，其中的原子相互碰撞，气体温度升高，直到最后，热得足以开始热聚变反应。这些反应将更多的氢转变成氦，释放出的热增加了压力，因此使星云不再继续收缩。它们会稳定地在这种状态下，作为像太阳一样的恒星停留一段很长的时间，它们将氢燃烧成氦，并将得到的能量以热和光的形式辐射出来。质量更大的恒星需要变得更热，以平衡它们更强的引力吸引，使得其核聚变反应进行得极快，以至于它们在1亿年这么短的时间里将氢耗光。然后，它们会稍微收缩一点，而随着它们进一步变热，就开始将氦转变成像碳和氧这样更重的元素。但是，这一过程没有释放出太多的能量，所以正如在黑洞那一章描述的，危机就会发生了。人们不完全清楚下一步还会发生什么，但是看来恒星的中心区域很可能坍缩成一个非常致密的状态，譬如中子星或黑洞。恒星的外部区域有时会在称为超新星的巨大爆发中吹出

来，这种爆发使星系中的所有恒星在相形之下显得黯淡无光。恒星接近生命终点时产生的一些重元素就被抛回到星系里的气体中去，为下一代恒星提供一些原料。因为我们的太阳是第二代或第三代恒星，是大约50亿年前由包含有更早超新星碎片的旋转气体云形成的，所以大约包含2%这样的重元素。云里的大部分气体形成了太阳或者喷到外面去，但是少量的重元素集聚在一起，形成了像地球这样的，现在作为行星围绕太阳公转的物体。

地球原先是非常热的，并且没有大气。在时间的长河中它冷却下来，并从岩石中散发气体得到了大气。我们无法在这早先的大气中存活。因为它不包含氧气，反而包含很多对我们有毒的气体，如硫化氢（即是使臭鸡蛋难闻的气体）。然而，存在其他能在这种条件下繁衍的原始的生命形式。人们认为，它们可能是作为原子的偶然结合，形成叫作宏观分子的大结构的结果，而在海洋中发展，这种结构能够将海洋中的其他原子聚集成类似的结构。它们就这样复制自己并繁殖。在有些情况下复制有些误差。这些误差通常使新的宏观分子不能复制自己，并最终被消灭。然而，一些误差会产生出新的宏观分子，它们会更有效地复制自己。因此它们具有优势，并且往往取代原先的宏观分子。进化的过程就是用这种方式开始，并导致越来越复杂的自我复制组织的产生。第一种原始的生命形式消化了包括硫化氢在内的不同物质，而释放出氧气。这就逐渐地将大气改变成今天这样的成分，并且允许诸如鱼、爬行动物、哺乳动物以及最后人类等生命的更高形式的发展。

宇宙从非常热的状态开始并随膨胀而冷却的景象，和我们今天所有的观测证据相一致。尽管如此，它还留下许多未被回答的重要问题：

（1）为何早期宇宙如此之热？

（2）为何宇宙在大尺度上如此均匀？为何它在空间的所有点上和所有方向上看起来相同？尤其是，当我们朝不同方向看时，为何微波辐射背景的温度几乎完全相同？这有点像问许多学生一个考试题。如果所有人都给出完全相同的回答，你就会相当肯定，他们相互之间交流过。在上述的模型中，从大爆炸开始光还没有来得及从一个遥远的区域到达另一个区域，即使这两个区域在宇宙的早期靠得很近。按照相对论，如果连光都不能从一个区域到达另一个区域，则没有任何其他的信息能做到。所以，除非因为某种不能解释的原因，导致早期宇宙中不同的区域刚好从同样的温度开始，否则没有一种方法能使它们达到相互一样的温

度。

（3）为何宇宙以这么接近于区分坍缩和永远膨胀模型的临界膨胀率开始，这样即使在100亿年以后的现在，它仍然几乎以临界的速率膨胀？如果在大爆炸后的1秒钟那一时刻其膨胀率哪怕小十亿亿分之一，那么在它达到今天这么大的尺度之前宇宙早已坍缩。

（4）尽管宇宙在大尺度上是如此的一致和均匀，它却包含有局部的无规性，诸如恒星和星系。人们认为，这些是从早期宇宙中不同区域之间密度的细小差别发展而来的。这些密度起伏的起源是什么？

广义相对论本身不能解释这些特征或回答这些问题，因为它预言，宇宙是从在大爆炸奇点处的无限密度起始的。广义相对论和所有其他物理定律在奇点处都失效了：人们不能预言从奇点会出来什么。正如以前解释的，这表明我们可以从这理论中割除去大爆炸奇点和任何先于它的事件，因为它们对我们没有任何观测效应。时空会有一个边界——大爆炸处的开端。

科学似乎揭示了一族定律，在不确定性原理设下的极限内，如果我们知道宇宙在任一时刻的状态，这些定律就会告诉我们，它如何随时间发展。这些定律也许原先是由上帝颁布的，但是看来从那以后他就让宇宙自身按照这些定律去演化，而现在不对它干涉。但是，他是怎么选择宇宙的初始状态和结构的呢？什么是在时间起始处的“边界条件”？

一种可能的回答是，上帝选择宇宙的这种初始结构是因为某些我们无望理解的原因。这肯定是在一个全能造物主的力量之内。但是如果他使宇宙以这种不能理解的方式开始，他为何又选择让它按照我们可理解的定律去演化？整部科学史正是对事件不是以任意方式发生，而是反映了一定内在秩序的逐步的意识。这个秩序可以是，也可以不是由神灵启示的。只有假定这种秩序不但应用于定律，而且应用于时空边界处的条件时才是自然的，这种条件指明宇宙的初始态。可以有大量具有不同初始条件的宇宙模型，它们都服从定律。应该存在某种原则去抽取一个初始状态，也就是一个模型，去代表我们的宇宙。

所谓的混沌边界条件即是这样一种可能性。这些条件含蓄地假定，要么宇宙是空间无限的，要么存在无限多宇宙。在混沌边界条件下，在刚刚大爆炸之后，寻求任何空间区域在任意给定的结构的概率，在某种

意义上，和它在任何其他结构的概率是一样的：宇宙初始态的选择纯粹是随机的。这意味着，早期宇宙可能是非常混沌和无序的。因为与光滑和有序的宇宙相比，存在着多得多的混沌和无序的宇宙（如果每一结构都是等概率的，因为混沌无序态多得这么多，宇宙多半会从这种态起始）。很难理解，从这样混沌的初始条件，如何导致今天我们这个在大尺度上如此光滑和规则的宇宙。人们还预料，在这样的模型中，密度起伏导致比伽马射线背景观测设定的上限多得多的太初黑洞的形成。

如果宇宙确实是空间无限的，或者如果存在无限多宇宙，就会存在某些从光滑和一致的形态开始演化的大的区域。这有点像著名的一大群猴子锤击打字机的故事——它们所写的大部分都是废话。但是纯粹由于偶然，它们可能碰巧打出莎士比亚的一首十四行诗。类似地，在宇宙的情形下，是否我们可能刚好生活在一个光滑和均匀的区域里呢？初看起来，这是非常不可能的，因为这样光滑的区域比混沌的无序的区域稀罕得多。然而，假定只有在光滑的区域里星系、恒星才能形成，才能有合适的条件，让像我们这样复杂的，能自然复制的机体得以发展，这种机体能够质疑宇宙为什么如此光滑的问题。这就是应用称为人存原理的一个例子。人存原理可以解释为："我们看到的宇宙之所以如此，乃是因为我们的存在。"

人存原理有弱的和强的意义下的两种版本。弱人存原理是讲，在一个大的或具有无限空间和/或时间的宇宙里，只有在某些时空有限的区域里，才存在智慧生命发展的必要条件。因此，在这些区域中，如果智慧生物观察到他们在宇宙的位置满足他们存在必要的条件，他们就不应感到惊讶。这有点像生活在富裕街坊的富人看不到任何贫穷。

应用弱人存原理的一个例子是"解释"为何大爆炸发生于大约100亿年之前——智慧生物大约需要那么长时间演化。正如前面解释的，一个早代的恒星必须首先形成。这些恒星将原先的一些氢和氦转化成像碳和氧这样的元素，由这些元素构成我们。然后恒星作为超新星而爆发，其裂片形成其他恒星和行星，其中就包括我们的太阳系，太阳系年龄大约是50亿年。地球存在的头10亿或20亿年，对于任何复杂东西的发展都嫌太热。余下的30亿年左右才用于生物进化的漫长过程，从最简单的生命，直到能够测量回溯到大爆炸的时间的生命，就在此期间形成。

很少有人会对弱人存原理的有效性提出异议。然而，有的人走得更远并提出强人存原理。按照这个理论，要么存在许多不同的宇宙，要么

存在一个单独宇宙的许多不同的区域，每一个都有自己初始的结构，或许还有自己的一族科学定律。这些宇宙中的大多数，不具备复杂机体发展的合适条件；只有在少数像我们的宇宙中，智慧生命才得以发展并能质疑：“为何宇宙是我们看到的这种样子？”答案很简单：如果它不是这个样子，我们就不会在这里！

我们现在知道，科学定律包含许多基本的数，如电子电荷的大小以及质子和电子的质量比。至少现在，我们不能从理论上预言这些数值——我们必须由观测找到它们。也许有一天，我们会发现一个将它们所有都预言出来的完备的统一理论，但是还有可能它们之中的一些或全部，在不同的宇宙或在一个单一宇宙之中是变化的。值得注意的事实是，这些数值看来是被非常细微地调整到让生命得以发展。例如，如果电子的电荷只要稍微有点不同，则要么恒星不能够燃烧氢和氦，要么它们没有爆炸过。当然，也许存在其他形式的，甚至还没被科学幻想作家梦想过的智慧生命。它并不需要像太阳这样恒星的光，或在恒星中制造出并在它爆炸时被抛到空间去的更重的化学元素。尽管如此，看来很清楚，允许任何智慧生命形式的发展的数值范围是比较小的。对于大部分数值的集合，宇宙也会产生，虽然它们可以是非常美的，可惜不包含任何一个能为如此美丽而倾倒的人。人们既可以认为这是在创生和科学定律选取中的神意的证据，也可以认为是对强人存原理的支持。

人们可以提出一系列理由，来反对用强人存原理解释观察到的宇宙状态。首先，在何种意义上，可以说所有这些不同的宇宙存在？如果它们确实相互隔开，在其他宇宙中发生的事件在我们自己的宇宙中就没有可观测的后果。所以，我们应该用经济原理，将它们从理论中割除掉。另一方面，它们若仅仅是一个单一宇宙的不同区域，则在每个区域里的科学定律必须是一样的，否则人们就不能从一个区域连续地运动到另一区域。在这种情况下，不同区域之间的仅有的不同是它们的初始结构。这样，强人存原理即归结为弱人存原理。

对强人存原理的第二个异议是，它和整个科学史的潮流背道而驰。我们现代的图象是从托勒密和他的支持者的地心宇宙论出发，通过哥白尼和伽利略日心宇宙论发展而来的。在此图象中，地球是一个中等大小的行星，它围绕着一个寻常的螺旋星系外圈的普通恒星作公转，而这星系本身只是可观察到的宇宙中大约万亿个星系之一。然而强人存原理却宣布，这整个庞大的构造仅仅是因我们的缘故而存在，这是非常令人难

以置信的。我们太阳系肯定是我们存在的前提，人们可以将之推广于我们的整个星系，作为让产生重元素的早代恒星存在的前提。但是，丝毫看不出存在任何其他星系的必要，宇宙在大尺度上也不必在每一方向上必须如此一致和类似。

如果人们能够表明，宇宙的相当多不同的初始结构会演化产生像我们今天看到的宇宙，至少在弱的形式上，人们会对人存原理感到更满意。如果果真如此，则一个从某些随机的初始条件发展而来的宇宙，应当包含许多光滑均匀的区域，而且这些区域适合智慧生命演化。另一方面，如果必须极端仔细地选择宇宙的初始条件，才能导致在我们周围所看到的一切，宇宙就不太可能包含任何会出现生命的区域。在上述的热大爆炸模型中，热来不及从一个区域流到另一区域。这意味着宇宙的初始态在每一处必须刚好有同样的温度，才能说明我们在每一方向上看到的微波背景辐射都有同样温度。其初始的膨胀率也要非常精确地选择，才能使现在的膨胀率仍然这么接近于需要用以避免坍缩的临界速率。这表明，如果热大爆炸模型直到时间的开端都是正确的，则确实必须非常仔细地选择宇宙的初始态。所以，除非作为上帝有意创造像我们这样生命的行为，否则很难解释，为何宇宙只用这种方式起始。

为了试图寻找一个能从许多不同的初始结构演化到像现在这样的宇宙的东西，麻省理工学院的科学家阿伦·固斯提出，早期宇宙可能经历过一个非常快速膨胀的时期。这种膨胀叫作“暴胀”，意指宇宙在一段时间里，不像现在这样以减少的，而是以增加的速率膨胀。按照固斯理论，在远远小于1秒的时间里，宇宙的半径增大了100万亿亿亿（1后面跟30个0）倍。

固斯提出，宇宙是以一种非常热而且相当混沌的状态从大爆炸起始的。这些高温表明宇宙中的粒子运动得非常快并具有高能量。正如早先我们讨论过的，人们预料在这么高的温度下，强核力和弱核力及电磁力都被统一成一个单独的力。随着宇宙膨胀，它会变冷，而粒子能量下降。最后出现了所谓的相变，并且力之间的对称性被破坏了：强力变得和弱力以及电磁力不同。相变的一个普通的例子是，当水降温时会冻结成冰。液态水是对称的，它在任何一点和任何方向上都是相同的。然而，当冰晶体形成时，它们有确定的位置，并在某一方向上整齐排列。这就破坏了水的对称。

在水的情形，只要你足够小心，就能使之“过冷”：也就是可以将温

度降低到冰点（0℃）以下而不结冰。固斯认为，宇宙的行为也很相似：宇宙温度可以降低到临界值以下，而各种力之间的对称没有受到破坏。如果发生这种情形，宇宙就处于一个不稳定状态，其能量比对称破缺时更大。可以指出，这特殊的额外能量呈现出反引力的效应：其作用如同一个宇宙常数。宇宙常数是当爱因斯坦在试图建立一个稳定的宇宙模型时，引进广义相对论之中去的。由于宇宙已经像大爆炸模型那样膨胀，所以这宇宙常数的排斥效应使得宇宙以不断增加的速度膨胀。即使在一些物质粒子比平均数更多的区域，这一有效宇宙常数的排斥作用也超过了物质的引力吸引作用。这样，这些区域也以加速暴胀的形式膨胀。当它们膨胀时，物质粒子就越分越开，留下了一个几乎不包含任何粒子，并仍然处于过冷状态的膨胀的宇宙。这种膨胀抹平了宇宙中的任何不规则性，正如当你吹胀气球时，它上面的皱纹就被抹平了。这样，从许多不同的非均匀的初始状态可以演化出宇宙现在光滑均匀的状态。

在这样一个其膨胀由宇宙常数加速，而不因物质的引力吸引使之减慢的宇宙中，早期宇宙中的光线就有足够的时间从一个区域旅行到另一个区域。这就解答了早先提出的，为何在早期宇宙中的不同区域具有同样性质的问题。不但如此，宇宙的膨胀率也自动变得非常接近由宇宙的能量密度决定的临界值。这就能够解释，不需假设宇宙初始膨胀率曾被非常仔细地选择过，为何现在的膨胀率仍然这么接近临界值。

暴胀的思想还能解释为何在宇宙中存在这么多物质。在我们能观察到的宇宙中大约有1亿亿亿亿亿亿亿亿亿亿（1后面跟80个0）个粒子。它们从何而来？答案是，在量子理论中，粒子可以以粒子/反粒子对的形式由能量中创生出来。但这只不过引起能量从何而来的问题。答案是，宇宙的总能量准确为零。宇宙中的物质是由正能量产生的。然而，物质本身由于引力总是吸引的。两块相互靠近的物质比两块分得很开的物质具有较少的能量，因为你必须消耗能量去克服把它们拉在一起的引力才能将其分开。这样，在一定意义上，引力场具有负能量。在空间上大体一致的宇宙的情形中，人们可以证明，这个负的引力能刚好抵消了物质所代表的正能量。这样，宇宙的总能量为零。

零的两倍仍为零。这样，宇宙可以同时将其正的物质能和负的引力能加倍，而不违反能量守恒。在宇宙正常膨胀时，这并没有发生。这时当宇宙变大时，物质能量密度下降。然而，这种情形确实发生于暴胀时期。因为当宇宙膨胀时，过冷态的能量密度保持不变：当宇宙体积加倍

时，正物质能和负引力能都加倍，这样总能量保持为零。在暴胀相，宇宙的尺度增大了一个非常大的倍数。这样，可用以制造粒子的总能量变得非常大。正如固斯说过的："都说没有免费午餐这回事，但是宇宙却是最彻底的免费午餐。"

今天宇宙不是以暴胀的方式膨胀。这样，必须有一种机制，它可以消去这一非常大的有效宇宙常数，从而使膨胀率从加速的状态改变为如同今天这样由引力减慢的状态。人们可以预料，在宇宙暴胀时各种力之间的对称最终会破缺，正如过冷的水最终会凝固一样。这样，未破缺的对称态的额外能量就会释放，并将宇宙重新加热到刚好低于使各种力对称的临界温度。以后，宇宙就以标准的大爆炸模式继续膨胀并变冷。但是，现在我们可以解释，为何宇宙刚好以临界速率膨胀，并且为何不同的区域具有相同的温度。

在固斯的原先设想中，有点像在非常冷的水中出现冰晶体，相变是突然发生的。其想法是，正如同沸腾的水围绕着蒸汽泡，新的对称破缺相的"泡泡"在原有的对称相中形成。设想泡泡膨胀并相互碰撞，直到整个宇宙处于新相。麻烦在于，正如同我和其他几个人指出的，宇宙膨胀得如此之快，即使泡泡以光速胀大，它们也要相互分离，并因此不能合并在一起。结果宇宙变成一种非常不均匀的状态，有些区域仍具有各种力之间的对称。这样的模型跟我们观察到的宇宙不吻合。

1981年10月，我去莫斯科参加量子引力的会议。会后，我在斯特堡天文研究所做了一个有关暴胀模型和它的问题的讲演。在此之前，我请其他人替我宣读讲稿，因为大多数人听不懂我的声音。但是这一次我来不及准备讲稿，所以我自己讲，让我的一名研究生逐字逐句地重复我的话。演讲进行得很顺利，使我有很多的时间和听众交谈。听众席中有一位年轻的苏联人，莫斯科列别捷夫研究所的安德雷·林德。他说，如果泡泡是如此之大，使得我们的宇宙区域被整个地包含在一个单独的泡泡之中，则可以避免泡泡不能合并在一起的困难。为了使这个行得通，从对称相向对称破缺相的改变必须在泡泡中发生得非常缓慢，但是按照大统一理论这是完全可能的。林德的缓慢对称破缺思想非常好，但是过后我意识到，他的泡泡在那一时刻必须比宇宙的尺度还要大！我指出，那时对称不仅仅在泡泡里，而且在所有的地方同时被破坏。这会导致一个正如我们观察到的一致的宇宙。我被这个思想弄得非常激动，并和我的一个学生因·莫斯讨论。然而，当我后来收到一个科学杂志社寄来的林德的

论文，征求是否可以发表时，作为他的朋友，我感到相当难为情。我答复说，这里有一个关于泡泡比宇宙还大的瑕疵，但是里面关于缓慢对称破缺的基本思想是非常好的。我建议将此论文照原样发表。因为林德要花几个月时间去改正它，并且他寄到西方的任何东西都要通过苏联的审查，这种对于科学论文的审查既无技巧可言又很缓慢。我和因·莫斯便越俎代庖，为同一杂志写了一篇短文。我们在该文中指出这些泡泡的问题，并提出如何将其解决。

我从莫斯科返回的第二天，即去费城接受富兰克林研究所的奖章。我的秘书朱迪·费拉施展其不俗的魅力说服了英国航空公司给她自己和我免费提供协和式飞机的广告旅行座席。然而，在去机场的路上被大雨耽搁，我没赶上航班。尽管如此，我最终还是到了费城并得到奖章。之后，我应邀在费城的爵索尔大学做了关于暴胀宇宙的演讲。我所做的讲演，正和在莫斯科的一样，是关于暴胀宇宙的问题。

几个月之后，宾州大学的保罗·斯特恩哈特和安德鲁斯·阿伯勒希特独立地提出和林德非常相似的思想。现在他们和林德分享以缓慢对称破缺的思想为基础的所谓“新暴胀模型”的荣誉。（旧的暴胀模型是指固斯关于形成泡泡后快速对称破缺的原始设想。）

新暴胀模型是一个好的尝试，它能解释宇宙为何是这种样子。然而我和其他几个人指出，至少在它原先的形式，它预言的微波背景辐射的温度变化要比观察到的大得多。后来的工作还对极早期宇宙中是否存在过这类需要的相变提出怀疑。我个人的意见是，现在新暴胀模型作为一个科学理论气数已尽。虽然还有很多人似乎不承认它的死亡，还继续写文章，好像那理论还有生命力。1983年，林德提出了一个更好的所谓混沌暴胀模型。这里没有相变和过冷，而代之以存在一个自旋为0的场，由于它的量子涨落，在早期宇宙的某些区域有大的场值。在那些区域中，场的能量起到宇宙常数的作用，它具有排斥的引力效应，而使这些区域以暴胀的形式膨胀。随着它们膨胀，它们中的场的能量慢慢地减小，直到暴胀改变到犹如热大爆炸模型中的膨胀时为止。这些区域之一就成为可观察的宇宙让我们看到。这个模型具有早先暴胀模型的所有优点，但是它并不取决于使人生疑的相变，此外，它还能给出微波背景辐射温度起伏的合理幅度，这与观测相符合。

暴胀模型的这个研究指出：宇宙现在的状态可以从相当大量的不同初始结构引起。这很重要，因为它表明不必非常细心地选取我们居住的

那部分宇宙区域的初始状态。所以，如果愿意的话，我们可以利用弱人存原理解释宇宙为何现在如此这般。然而，绝不是任何一种初始结构都会产生像我们观察到的宇宙。这一点很容易做到。考虑现在宇宙处于一个非常不同的态，例如一个非常成团的非常无规则的态。人们可以利用科学定律，在时间上将其演化回去，以确定宇宙在更早时刻的结构。按照经典广义相对论的奇点定理，仍然存在一个大爆炸奇点。如果你在时间前进方向上按照科学定律演化这样的宇宙，你就会得到你从其开始的那个成团的无规则的态。这样，必定存在不会产生像我们今天观察到的宇宙的初始结构。所以，就连暴胀模型也没有告诉我们，为何初始结构不是那种态，从它演化成和我们观测到的非常不同的宇宙。我们是否应该再从人存原理得到解释呢？难道所有这一切仅仅是因为好运气？看来，这只是无望的遁词，是对我们理解宇宙根本秩序的所有希望的否定。

为了预言宇宙应该如何起始，人们需要在时间开端处成立的定律。罗杰·彭罗斯和我证明的奇点定理指出，如果广义相对论的经典理论是正确的，则时间的开端是具有无限密度和无限时空曲率的一点，在这样的点上所有已知的科学定律都崩溃。人们可以设想存在在奇点处成立的新定律，但是在如此不守规矩之处，甚至连表述这样的定律都是非常困难的，而且从观察中我们没有得到关于这些定律应是什么样子的任何指示。然而，奇点定理真正揭示的是，引力场变得如此之强，使量子引力效应变得十分重要：经典理论已经不能很好地描述宇宙。这样，人们必须用量子引力论去讨论宇宙的极早期阶段。正如我们将会看到的，在量子力学中，通常的科学定律有可能在任何地方都有效，包括时间开端这一点在内：不必针对奇点提出新的定律，因为在量子理论中不必存在任何奇点。

我们仍然没有一套完备而协调的理论将量子力学和引力结合在一起。然而，我们相当清楚这样一套统一理论所应该具备的某些特征。其中一个就是它必须和费恩曼提出的按照对历史求和的量子力学表述相合并。在这种方法里，一个粒子不像在经典理论中那样，不仅只有一个单独的历史。相反，它被认为通过时空里的任何可能的路径，这些历史中的每一个都有一对相关的数，一个代表波的幅度，另一个代表它在循环中的位置（相位）。粒子通过某一特定点的概率是将通过此点的所有可能历史的波叠加求得。然而，当人们实际去进行这些求和时，就遭遇到了严重的技术问题。回避这个问题的仅有的独特方法是：你必须不是对

发生在你我经验的“实的”时间内的，而是对发生在所谓“虚的”时间内的粒子历史的波进行求和。虚时间可能听起来像是科学幻想，但事实上，它是定义得很好的数学概念。如果你取任何平常的（或“实的”）数和它自己相乘，结果是一个正数（例如2乘2是4，但-2乘-2也是这么多。）然而，存在一种特别的数（叫虚数），当它们自乘时得到负数（叫做i的数自乘时得-1，2i自乘得-4，等等）。

人们可以用下面的办法来图解实数和虚数：实数可以用一根从左至右的线来代表，中间是零点，像-1，-2等负数在左边，而像1，2等正数在右边。而虚数由书页上一根上下的线来代表，i，2i等在中点以上，而-i，-2i等在中点以下。这样，在某种意义上，虚数和通常的实数夹一直角。

人们必须利用虚时间，以避免在进行费恩曼对历史求和的技术上的困难。也就是说，为了计算的目的，人们必须用虚数而不是用实数来测量时间。这对时空有一有趣的效应：时间和空间的区别完全消失。事件具有虚值时间坐标的时空称为欧几里得型的，它是采用建立了二维面几何的希腊人欧几里得的名字命名的。我们现在称之为欧几里得时空的东西，除了是四维而不是二维以外，其余的和它都非常相似。在欧几里得时空中，时间方向和在空间中的方向没有不同之处。另一方面，在通常用实的时间坐标来标记事件的实的时空里，人们很容易区别这两种方向——位于光锥中的任何点是时间方向，位于光锥之外的为空间方向。无论如何，就日常的量子力学而言，我们利用虚的时间和欧几里得时空，可以认为仅仅是一个计算有关实时空的答案的数学手段（或技巧）。

我们相信，作为任何终极理论的一部分而不可或缺的第二个特征是爱因斯坦的思想，即引力场由弯曲的时空来代表：粒子在弯曲空间中试图沿着最接近于直线的某种路径走。但是因为时空不是平坦的，它们的路径看起来似乎被引力场折弯了。当我们利用费恩曼的历史求和方法去处理爱因斯坦的引力观点时，和粒子的历史相类似的东西则是代表整个宇宙历史的完整的弯曲时空。为了避免实际进行历史求和的技术困难，这些弯曲的时空必须采用欧几里得型的。也就是，时间是虚的并和空间的方向不可区分。为了计算找到具有一定性质的，例如在每一点和每一方向上看起来都一样的实时空的概率，人们把和所有具有这性质的历史相关联的波叠加起来即可。

在广义相对论的经典理论中，可能有许多不同的弯曲时空，每一个

对应于宇宙不同的初始态。如果我们知道我们宇宙的初始态，我们就会知道它的整个历史。类似地，在量子引力论中，宇宙可能存在许多不同的量子态。同样地，如果我们知道在历史求和中的欧几里得弯曲时空在早先时刻的行为，我们就会知道宇宙的量子态。

在以实的时空为基础的经典引力论中，宇宙可能的行为只有两种方式：要么它已存在了无限长时间，要么它在有限的过去的某一时刻的奇点上有一个开端。而在量子引力论中，产生了第三种可能性。因为人们采用欧几里得时空，在这里时间方向和空间方向具有相同的地位，所以时空有可能在范围上是有限的，却没有形成边界或边缘的奇点。时空就像是地球的表面，只不过多了两维。地球的表面在范围上是有限的，但它没有边界或边缘：如果你朝着落日的方向驾船，你不会掉到边缘外面或陷入奇点中去。（因为我曾经环球旅行过，所以知道！）

如果欧几里得时空延伸到无限的虚时间，或者在一个虚时间奇点处开始，我们就会遇到和经典理论中指定宇宙初态同样的问题：即上帝可以知道宇宙如何开始，但是我们提不出任何特别原因，认为它应以这种而不是那种方式开始。另一方面，量子引力论开辟了另一种新的可能性，在这里时空没有边界，所以没有必要指定边界上的行为。这里不存在在该处科学定律崩溃的奇点，也就是不存在在该处必须祈求上帝或某些新的定律给时空设定边界条件的时空边缘。人们可以说："宇宙的边界条件是它没有边界。"宇宙便是完全自足的，而不受任何外在于它的东西影响。它既不被创生，也不被消灭。它就是存在。

我正是在早先提到的那次梵蒂冈会议上首次提出，时间和空间可能会共同形成一个在尺度上有限却没有任何边界或边缘的面。然而我的论文数学气息太浓，所以文章中包含的上帝在创生宇宙的作用的含义在当时没被普遍意识到（对我也是如此）。在梵蒂冈会议期间，我不知道如何用"无边界"思想去预言宇宙。然而，次年夏天我在加州大学的圣塔芭芭拉分校度过。在那里，我的一位朋友兼合作者詹姆·哈特尔和我共同得出了如果时空没有边界时宇宙应满足的条件。回到剑桥后，我和我的两个研究生朱丽安·拉却尔和约纳逊·哈里威尔继续从事这项工作。

我要着重说明，时空是有限而"无界"的思想仅仅是一个设想，它不能从其他原理导出。正如任何其他科学理论，它原先可由美学或形而上学的原因提出，但是它给出的预言是否与观测相一致是对它的真正检验。不过，在量子引力的情况下，由于以下两个原因这很难确定。首

先，正如将要在第11章解释的，虽然我们对能将广义相对论和量子力学合并在一起的理论应具有的方式，已经知道得相当多，但是还不能准确地知道哪种理论能成功地做到这一点。其次，任何详尽描述整个宇宙的模型在数学上都过于复杂，使我们不能通过计算做出准确的预言。所以，人们不得不做简化的假设和近似——并且甚至这样，要从中引出预言仍是令人生畏的课题。

对历史求和中的每一个历史不只描述时空，而且描述在其中的任何东西——包括像能观察宇宙历史的人类那样复杂的生物。这可对人存原理提供另一个支持，因为如果任何历史都是可能的，就可以用人存原理去解释为何我们发现宇宙是当前这样子。对我们并不存在其中的其他历史究竟应赋予什么意义还不清楚。然而，如果利用对历史求和可以显示，我们的宇宙不只是一个可能的，而且是最有可能的历史，则这个量子引力论的观点就会令人满意得多。为此，我们必须对所有可能的没有边界的欧几里得时空进行历史求和。

人们从“无边界”假定得知，宇宙遵循大多数历史的机会是可以忽略不计的，但是有一族特别的历史比其他的历史有多得多的机会。这些历史可以描绘得像地球的表面。在那里与北极的距离代表虚的时间，并且离北极等距离的圆周长代表宇宙的空间尺度。宇宙作为单独一点从北极起始。随着人们往南走，离开北极等距离的纬度圈变大，这和宇宙随虚时间的膨胀相对应（图8.1）。宇宙在赤道处会达到最大的尺度，并且随着虚时间的继续增加而收缩，最后在南极收缩成一点。尽管宇宙在南北二极的尺度为零，但是这些点不是奇点，它们并不比地球上的北南二极更奇异。科学定律在它们那里有效，正如同它们在地球上的南北二极有效一样。

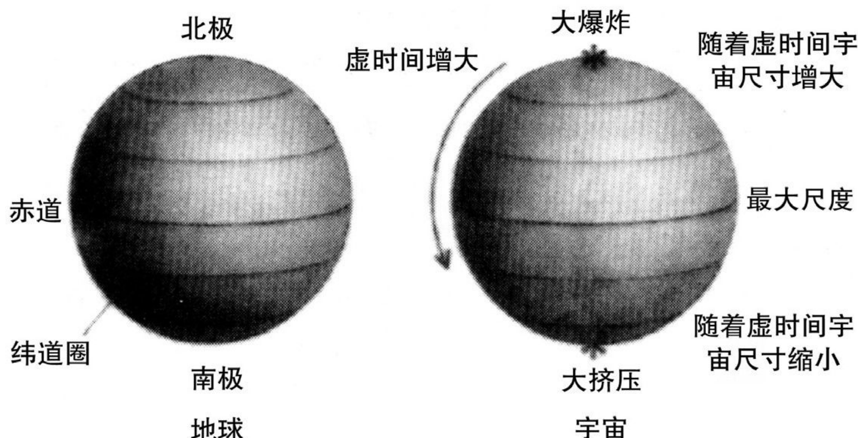


图8.1

然而，宇宙的历史在实的时间里显得非常不一样。大约在100亿年或200亿年以前，它有一个最小的尺度，它等于历史在虚时间里的最大半径。在后来的实时间里，宇宙就会像由林德设想的混沌暴胀模型那样地膨胀（但是现在人们不必假定宇宙以某种方式从一类合适的状态产生出来）。宇宙会膨胀到一个非常大的尺度，并最终重新坍缩成为在实时间里看起来像是奇点的一个东西。这样，在某种意义上说，即使我们躲开黑洞，仍然是注定要毁灭的。只有当我们按照虚时间来描绘宇宙时才不会有奇点。

如果宇宙确实处在这样的一个量子态，宇宙在虚时间里就没有奇点。因此，我近期的工作似乎使我早期研究奇点的工作成果完全付之东流。但是正如上面指出的，奇点定理的真正重要性在于，它们指出引力场必然会强到不能无视量子引力效应的程度。这接着导致也许在虚时间里宇宙的尺度有限但没有边界或奇点的观念。然而，当人们回到我们生活其中的实时间时，那里仍会出现奇点。陷进黑洞的那位可怜的航天员的结局仍然是极可悲的；只有当他在虚时间里生活，才不会遭遇到奇点。

上述这些也许暗示所谓的虚时间才是真正的实时间，而我们叫做实时间的东西恰恰是子虚乌有的空想的产物。在实时间中，宇宙具有开端和终结的奇点，这奇点构成了科学定律在那里失效的时空边界。但是，在虚时间里不存在奇点或边界。所以，很可能我们称作虚时间的才真正是更基本的观念，而我们称作实时间的反而是我们臆造的，它仅仅有助

于我们描述我们认为的宇宙模样，如此而已。但是，按照我在第1章描述的方法，科学理论只不过是我们用以描述自己观察的数学模型：它只存在于我们的头脑中。所以去问诸如这样的问题是毫无意义的："实的"或"虚的"时间，哪一种是实在的？这仅仅是哪一种描述更为有用的问题。

人们还可以利用对历史求和以及无边界设想去发现宇宙的哪些性质很可能发生。例如，人们可以计算，当宇宙具有现在密度的某一时刻，在所有方向上以几乎同等速率膨胀的概率。在迄今已被考察的简化的模型中，发现这个概率是高的；也就是说，无边界设想导致一个预言，即宇宙现在在每一方向的膨胀率几乎相同是极其可能的。这与微波背景辐射的观测相一致，它指出在任何方向上具有几乎完全同样的强度。如果宇宙在某些方向比其他方向膨胀得更快，一个附加的红移就会减小那些方向辐射的强度。

人们正在研究无边界条件的进一步预言。一个特别有趣的问题是，早期宇宙中物质密度对其均匀密度的小幅度偏离。这些偏离首先引起星系，然后是恒星，最后是我们自身的形成。不确定性原理意味着，早期宇宙不可能是完全均匀的，因为粒子的位置和速度必定存在一些不确定性或起伏。利用无边界条件，我们发现，在事实上，宇宙必须恰好从由不确定性原理允许的最小可能的非均匀性开始。然后，正如在暴胀模型中预言的一样，宇宙经历了一段快速膨胀时期。在这个期间，初始的非均匀性被放大到足以解释在我们周围观察到的结构的起源。1992年宇宙背景探险者卫星（COBE）首次检测到微波背景随方向的非常微小的变化。这种非均匀性随方向的变化方式似乎和暴胀模型以及无边界设想的预言相符合。这样，在卡尔·波普的意义上，无边界设想是一种好的科学理论：它可以被观测证伪，但是它的预言却被证实了。在一个各处物质密度稍有变化的膨胀宇宙中，引力使得较紧密区域的膨胀减慢，并使之开始收缩。这就导致星系、恒星和最终甚至像我们自己这样微不足道的生物的形成。这样，宇宙无边界条件和量子力学中的不确定性原理一道，可以解释我们在宇宙中看到的所有复杂的结构。

空间和时间可以形成一个没有边界的闭曲面的思想，对于上帝在宇宙事务中的作用还有一个深远的含义。随着科学理论在描述事件方面的成功，大部分人进而相信上帝允许宇宙按照一套定律来演化，而不介入其间使宇宙触犯这些定律。然而，定律并没有告诉我们，宇宙的太初应

该像什么样子——它依然要靠上帝去卷紧发条，并选择如何去启动它。只要宇宙有一个开端，我们就可以设想存在一个造物主。但是，如果宇宙的的确确是完全自足的，没有边界或边缘，它就既没有开端也没有终结：它就是存在。那么，还会有造物主存身之处吗？

第9章　时间箭头

我们在前几章中看到了，长期以来人们关于时间性质的观点是如何变化的。直到20世纪初，人们还相信绝对时间。也就是说，每一事件可由一个称为“时间”的数以唯一的方式来标记，所有好的钟在测量两个事件之间的时间间隔上都是一致的。然而，对于任何正在运动的观察者，不管他怎么运动，光速总是一样的这一发现，导致了相对论——而在相对论中，人们必须抛弃存在一个唯一的绝对时间的观念，相反，每个观察者都有由他携带的钟记录的他自己的时间测量：不同观察者携带的钟不必要一致。这样，相对于进行测量的观察者而言，时间变成一个更个人的概念。

当人们试图统一引力和量子力学时，必须引入“虚”时间的概念。虚时间是不能和空间方向区分的。如果一个人能往北走，他就能转过头并朝南走；同样的，如果一个人能在虚时间里向前走，他应该能够转过来并往后走。这表明在虚时间里，往前和往后之间不可能有重要的差别。另一方面，当人们考察“实”时间时，正如众所周知的，在前进和后退方向存在着非常巨大的差别。过去和将来之间的这种差别从何而来？为何我们记住过去而不是将来？

科学定律并不区别过去和将来。更精确地讲，正如前面解释的，科学定律在称作C、P和T的联合作用（或对称）下不变。（C是指用反粒子替代粒子。P的意思是取镜像，这样左和右就相互交换了。而T是指颠倒所有粒子的运动方向：事实上，是使运动倒退回去。）在所有正常情形下，制约物体行为的科学定律在CP联合对称下独自不变。换言之，对于其他行星上的居民，若他们是我们的镜像并且由反物质而不是物质构成，则生活会刚好和我们一样。

如果科学定律在CP联合作用以及CPT联合作用下都不变，它们也必须在单独的T作用下不变。然而，在日常生活的实时间中，前进和后退的方向之间还是有一个大的差异。想象一杯水从桌子上滑落在地板上被打碎。如果你将其录像，你可以容易地辨别出它是向前进还是向后退。如果将其倒放回来，你会看到碎片忽然集中到一起离开地板，并跳回到桌子上形成一个完整的杯子。你可断定录像是在倒放，因为在日常生活

中从未见过这种行为。如果发生这样的事，陶瓷业将无生意可做。

为何我们从未看到破碎的杯子集合起来，离开地面并跳回到桌子上，通常的解释是这违背了热力学第二定律。它可表述为，在任何闭合系统中无序度或熵总是随时间而增加。换言之，它是墨菲定律的一种形式：事情总是越变越糟！桌面上一个完整的杯子是一个高度有序的状态，而地板上破碎的杯子是一个无序的状态。人们很容易从早先桌子上的杯子变成后来地面上的碎杯子，而不是相反。

无序度或熵随着时间增加是所谓的时间箭头的一个例子。时间箭头将过去和将来区别开来，使时间有了方向。至少有三种不同的时间箭头：第一个，是热力学时间箭头，即是在这个时间方向上无序度或熵增加；然后是心理学时间箭头，这就是我们感觉时间流逝的方向，在这个方向上我们可以记忆过去而不是未来；最后，是宇宙学时间箭头，宇宙在这个方向上膨胀，而不是收缩。

我将在这一章论断，宇宙的无边界条件和弱人存原理一起能解释为何所有的三个箭头指向同一方向——此外，为何必须存在一个定义得很好的时间箭头。我将论证热力学箭头确定心理学箭头，并且这两种箭头必须总是指向相同的方向。如果人们假定宇宙的无边界条件，我们将看到必然存在定义得很好的热力学和宇宙学时间箭头。但对于宇宙的整个历史来说，它们并不总是指向同一方向。然而，我将论断，只有当它们指向一致时，对于能够发问为何无序度在宇宙膨胀的时间方向上增加的智慧生命的发展，才有合适的条件。

首先，我要讨论热力学时间箭头。总存在着比有序状态多得多的无序状态的这一事实，导致热力学第二定律。譬如，考虑一盒拼板玩具，存在一个并且只有一个使这些小纸片拼成一幅完整图画的排列。另一方面，存在巨大数量的排列，这时小纸片是无序的，不能拼成一幅画。

假设一个系统从这少数的有序状态之一出发。随着时间流逝，这个系统将按照科学定律演化，而且它的状态将改变。到后来，因为存在着更多的无序状态，它处于无序状态的可能性比处于有序状态更大。这样，如果一个系统服从一个高度有序的初始条件，它的无序度就会随着时间的增加而增大。

假定拼板玩具盒的纸片从排成一幅图画的有序组合开始，如果你摇

动这盒子，这些纸片将会采用其他组合，这很可能是一个不形成一幅合适图画的无序的组合，就是因为存在如此之多得多的无序的组合。有一些纸片团仍可能形成部分图画，但是你越摇动盒子，这些团就越可能被分开，这些纸片将处于完全混乱的状态，在这种状态下它们不能形成任何种类的图画。这样，如果纸片从一个高度有序的状态的初始条件出发，纸片的无序度将可能随时间而增加。

然而，假定上帝决定不管宇宙从何状态开始，它都必须结束于一个高度有序的状态，则在早期这宇宙很可能处于无序的状态。这意味着无序度将随时间而减小。你将会看到破碎的杯子集合起来并跳回到桌子上。然而，任何观察杯子的人都生活在无序度随时间减小的宇宙中，我将论断这样的人会有一个倒溯的心理学时间箭头。这就是说，他们会记住将来的事件，而不是过去的事件。当杯子被打碎时，他们会记住它在桌子上的情形；但是当它在桌子上时，他们不会记住它在地面上的情景。

由于我们不知道大脑工作的细节，所以谈论人类的记忆是相当困难的。然而，我们确实完全知道计算机的记忆器是如何工作的。因此，我将讨论计算机的心理学时间箭头。我认为，可以合理假定计算机和人类有相同的箭头。如果不是这样，人们可能因为拥有一台记住明天价格的计算机而在股票交易中大发利市！

大体来说，计算机的记忆器是一个包含可处于两种状态中的任意一种的元件的设备，算盘是一个简单的例子。其最简单的形式是由许多铁条组成；每一根铁条上有一念珠，此念珠可呆在两个位置中的一个。在计算机记忆器进行存储之前，其记忆器处于无序态，念珠等概率地处于两个可能的状态中（算盘珠杂乱无章地散布在算盘的铁条上。）在记忆器和要记忆的系统相互作用后，根据系统的状态，它肯定处于这种或那种状态（每个算盘珠将要么位于铁条的左边，要么处于右边）。这样，记忆器就从无序态转变成有序态。然而，为了保证记忆器处于正确的状态，需要使用一定的能量（例如，移动算盘珠或给计算机接通电源）。这能量以热的形式耗散了，从而增加了宇宙的无序度的量。人们可以证明，这个无序度增量总比记忆器本身有序度的增量大。这样，由计算机冷却风扇排出的热量表明计算机将一个项目记录在它的记忆器中时，宇宙的无序度的总量仍然增加。计算机记忆过去的时间方向和无序度增加的方向是一致的。

因此，我们对时间方向的主观感觉或心理学时间箭头，是在我们头脑中由热力学时间箭头决定的。正像一台计算机，我们必须在熵增加的顺序上将事物记住。这几乎使热力学定律变成为无聊的东西。无序度随时间的增加乃是因为我们是在无序度增加的方向上测量时间。你不可能有比这个更具胜算的打赌了！

但是究竟热力学时间箭头为何必须存在呢？或换句话说，在我们称之为过去的时间的一端，宇宙为何处于高度有序的状态呢？它为何不在所有时间里处于完全无序的状态呢？毕竟这似乎更为可能。还有，为何无序度增加的时间方向和宇宙膨胀的方向相同？

在经典广义相对论中，因为所有已知的科学定律在大爆炸奇点处崩溃，人们不能预言宇宙是如何开始的。宇宙可以从一个非常光滑和有序的状态开始。这就会导致正如我们观察到的，定义很好的热力学和宇宙学的时间箭头。但是，它也可以同样合理地从一个非常波浪起伏的无序状态开始。在那种情况下，宇宙已经处于一种完全无序的状态，所以无序度不会随时间增加。它要么保持常数，这时就没有定义得很好的热力学时间箭头；它要么会减小，这时热力学时间箭头就会和宇宙学时间箭头反向。这些可能性的任意一种都不符合我们观察到的情况。然而，正如我们看到的，经典广义相对论预言了它自身的崩溃。当时空曲率变大时，量子引力效应变得重要，而经典理论不再能很好地描述宇宙。人们必须用量子引力论去理解宇宙是如何开始的。

正如我们在上一章看到的，在量子引力论中，为了指定宇宙的态，人们仍然必须说清宇宙的可能历史在过去的时空边界是如何行为的。只有当这些历史满足无边界条件，人们才可能避免这个不得不描述我们不知道和无法知道的东西的困难：它们在尺度上有限，但是没有边界、边缘或奇点。在这种情形下，时间的开端就会是规则的光滑的时空的点，并且宇宙在一个非常光滑和有序的状态下开始它的膨胀。它不可能是完全均匀的，否则就违反了量子理论的不确定性原理。必然存在粒子密度和速度的微小起伏，然而无边界条件意味着，这些起伏又是在与不确定性原理相一致的条件下尽可能地小。

宇宙刚开始时有一个指数膨胀或“暴胀”时期，在这期间它的尺度增加了一个非常大的倍数。在这个膨胀过程中，密度起伏起初一直很小，但是后来开始变大。在密度比平均值稍大的区域，额外质量的引力吸引使膨胀速度放慢。最终，这样的区域停止膨胀，并坍缩形成星系、恒星

以及像我们这样的生命。宇宙开始时处于一个光滑有序的状态，而随时间演化成波浪起伏的无序的状态。这就解释了热力学时间箭头的存在。

如果宇宙停止膨胀，并且开始收缩，将会发生什么呢？热力学箭头会不会倒转过来，而无序度开始随时间减少呢？这为从膨胀相存活到收缩相的人们留下了五花八门的类科学幻想的可能性。他们是否会看到杯子的碎片集合起来，离开地板，并跳回到桌子上去呢？他们会不会记住明天的价格，并在股票市场上发财致富？由于宇宙至少要再等100亿年之后才开始收缩，忧虑那时会发生什么似乎有点学究气。但是有一种更快的办法去查明将来会发生什么：跳到黑洞里面去。恒星坍缩形成黑洞的过程和整个宇宙坍缩的后期相当类似。这样，如果在宇宙的收缩相无序度减小，可以预料它在黑洞里面也会减小。所以，一个落到黑洞里去的航天员在下赌注之前，也许能依靠记住轮赌盘上球儿的走向而赢钱。（然而，不幸的是，玩不了多久，他就会变成意大利面条。他也不能使我们知道热力学箭头的颠倒，或者甚至将他赢的钱存入银行，因为他被困在黑洞的事件视界后面。）

起初，我相信在宇宙坍缩时无序度会减小。这是因为，我认为宇宙再次变小时，它必须回到光滑和有序的状态。这表明，收缩相就像是膨胀相的时间反演。处在收缩相的人们将以倒退的方式生活：他们在出生之前即已死去，并且随着宇宙收缩变得更年轻。

这个观念是吸引人的，因为它表明在膨胀相和收缩相之间存在一个漂亮的对称。然而，人们不能置有关宇宙的其他观念于不顾，而只采用这个观念。问题在于：无边界条件是否隐含着这个对称，或者它是否与这个条件不相协调？正如我说过的，我起先以为无边界条件确实意味着无序度会在收缩相中减小。我之所以被误导，部分是由于与地球表面的类比引起的。如果人们将宇宙的开初对应于北极，那么宇宙的终结就应该类似于它的开端，正如南极之与北极相似。然而，南北二极对应于虚时间中的宇宙的开端和终结。在实时间里的开端和终结之间可有非常大的差异。我还被我做过的一项简单的宇宙模型的研究误导，在此模型中坍缩相似乎是膨胀相的时间反演。然而，我的一位合作者，宾夕法尼亚州立大学的唐·佩奇指出，无边界条件没有要求收缩相必然是膨胀相的时间反演。我的一个学生雷蒙·拉夫勒蒙进一步发现，在一个稍复杂的模型中，宇宙的坍缩和膨胀非常不同。我意识到自己犯了一个错误：无边界条件意味着，事实上在收缩相时无序度继续增加。当宇宙开始收缩时或

在黑洞中，热力学和心理学时间箭头不会反向。

当你发现自己犯了像这样的错误后该如何办？有些人从不承认他们是错误的，而继续去找新的往往相互不协调的论据为自己辩解——如爱丁顿在反对黑洞理论时之所为。另外一些人首先宣称，从来没有真正支持过不正确的观点，如果他们支持了，也只是为了显示它是不协调的。在我看来，如果你在出版物中承认自己错了，那会好得多并少造成混乱。爱因斯坦即是一个好的榜样，他在试图建立一个静态的宇宙模型时引入了宇宙常数，他称此为一生中最大的错误。

回头再说时间箭头，余下的问题是：为何我们观察到热力学和宇宙学箭头指向同一方向？或者换言之，为何无序度增加的时间方向正是宇宙膨胀的时间方向？如果人们相信，按照无边界设想似乎隐含的那样，宇宙先膨胀然后重新收缩，那么为何我们应在膨胀相中而不是在收缩相中，这就成为一个问题。

人们可以在弱人存原理的基础上回答这个问题。收缩相的条件不适合智慧人类的存在，而正是他们能够提出这个问题：为何无序度增加的时间方向和宇宙膨胀的时间方向相同？无边界设想预言的宇宙在早期阶段的暴胀意味着，宇宙必须以非常接近为恰好避免坍缩所需要的临界速率膨胀，这样它在很长的时间内才不至于坍缩。到那时候所有的恒星都会烧尽，而在其中的质子和中子可能会衰变成轻粒子和辐射。宇宙将处于几乎完全无序的状态，这时就不会有强的热力学时间箭头。由于宇宙已经处于几乎完全无序的状态，无序度不会增加很多。然而，对于智慧生命的行动来说，一个强的热力学箭头是必需的。为了生存下去，人类必须消耗能量的一种有序形式——食物，并将其转化成能量的一种无序形式——热量，这样智慧生命不能在宇宙的收缩相中存在。这就解释了为何我们观察到热力学和宇宙学的时间箭头指向一致。并不是宇宙的膨胀导致无序度的增加，而是无边界条件引起无序度的增加，并且只有在膨胀相中才有适合智慧生命的条件。

总之，科学定律并不能区分前进和后退的时间方向。然而，至少存在三个时间箭头，将过去和将来区分开来。它们是热力学箭头，这就是无序度增加的时间方向；心理学箭头，即是在这个时间方向上，我们能记住过去而不是将来；还有宇宙学箭头，也即宇宙膨胀的方向而不是收缩的方向。我指出了心理学箭头本质上应和热力学箭头相同。宇宙的无边界设想预言了存在定义得很好的热力学时间箭头，因为宇宙必须从光

滑的有序的状态开始。并且我们看到，热力学箭头和宇宙学箭头的一致，乃是由于智慧生命只能在膨胀相中存在。因为在收缩相那里没有强的热力学时间箭头，所以不适合智慧生命的存在。

人类理解宇宙的进步，在一个无序度增加的宇宙中建立了一个很小的有序的角落。如果你记住了这本书中的每一个词，你的记忆就记录了大约200万单位的信息——你头脑中的有序度就增加了大约200万单位。然而，当你读这本书时，你至少将以食物为形式的1000卡路里（1热化学卡＝4.184焦）的有序能量，以对流和出汗释放到你周围空气中的热量的形式，换成为无序能量。这就将宇宙的无序度增大了大约20亿亿亿单位，或大约是你头脑中有序度增量——如果你记住这本书的每一件事的话——的1000亿亿倍。我试图在下面各章再增加一些我们头脑的有序度，解释人们如何将我描述过的部分理论结合在一起，形成一个完备的统一理论，这个理论将适用于宇宙中的任何东西。

第10章　虫洞和时间旅行

我们在上一章讨论了，为什么我们看到时间向前进：为什么无序度增加，并且我们记住过去而非将来。时间好像是一条笔直的铁轨，人们只能往一个方向前进。

如果该铁轨有环圈以及分岔，使得一直往前开动的火车却返回原先通过的车站，这是怎么回事呢？人们能否旅行到未来或过去呢？

H.G.韦尔斯在《时间机器》中，正好像其他无数的科学幻想作家那样，探讨了这些可能性。科学幻想的许多观念，诸如潜水艇以及飞往月亮等都已变成了科学的事实。那么，时间旅行的前景如何呢？

1949年库尔特·哥德尔发现了广义相对论允许的新的时空。这首次表明物理学定律的确允许人们在时间里旅行。哥德尔是一名数学家，他由于证明了不完备性定理而名震天下。该定理是说，不可能证明所有真的陈述，即使你只试图证明像算术这么明确而且枯燥的学科中所有真的陈述。这个定理也许是我们理解和预言宇宙能力的基本极限，然而至少迄今为止，它似乎还未成为我们寻求完备统一理论的障碍。

哥德尔在和爱因斯坦于普林斯顿高级学术研究所度过他们晚年时通晓了广义相对论。他的时空具有一个古怪的性质：整个宇宙都在旋转。人们也许会问：“它相对于何物旋转？”其答案是远处的物体围绕着小陀螺或者陀螺仪的指向旋转。

这导致一个附加的效应，一位航天员可能在他乘航天飞船出发之前即已回到地球。这个性质使爱因斯坦非常沮丧，他曾经以为广义相对论不允许时间旅行。然而，鉴于爱因斯坦对引力坍缩和不确定性原理的无端反对，这也许反而是一个令人鼓舞的迹象。因为我们可以证明，我们生存其中的宇宙是不旋转的，所以哥德尔找到的解并不对应于它。它还有一个非零的宇宙常数。宇宙常数是当爱因斯坦以为宇宙是不变时引进的。在哈勃发现了宇宙的膨胀后，就不再需要宇宙常数，而现在普遍认为它应为零。然而，之后从广义相对论又找到其他一些更合理的时空，它们允许旅行到过去。其中之一即是旋转黑洞的内部。另外一种是包含两根快速相互穿越的宇宙弦的时空。顾名思义，宇宙弦是弦状的物体，

它具有长度，但是截面很微小。实际上，它们更像在巨大张力下的橡皮筋，其张力大约为1亿亿亿吨。把一根宇宙弦系到地球上，就会把地球在1/30秒的时间里从每小时零英里加速到每小时60英里。宇宙弦初听起来像是科学幻想物，但有理由相信，在早期宇宙中由在第5章讨论过的那种对称破缺机制可以形成宇宙弦。因为宇宙弦具有巨大的张力，而且可以从任何形态起始，所以它们一旦伸展开来，就会加速到非常高的速度。

哥德尔解和宇宙弦时空一开始就这么扭曲，使得总能旅行到过去。上帝也许会创生了一个如此卷曲的宇宙，但是我们没有理由相信他会这样做。微波背景和轻元素丰度的观测表明，早期宇宙并没有允许时间旅行的曲率。如果无边界设想是正确的，从理论的基础上也能导出这个结论。这样问题就变成：如果宇宙初始就没有时间旅行必需的曲率，我们能否随后把时空的局部区域卷曲到这种程度，直至允许时间旅行？

快速恒星际或星系际旅行是一个密切相关的，也是科学幻想作家关心的问题。根据相对论，没有东西比光运动得更快。因此，如果我们向我们最近邻的恒星——比邻星——发送航天飞船，由于它大约在4光年那么远，所以我们预料至少要8年才能等到旅行者们回来报告他们的发现。如果要去银河系中心探险，至少要10万年才能返回。相对论确实给了我们一些宽慰。这就是在第2章提及的双生子佯谬。

因为时间不存在唯一的标准，而每一位观察者都拥有他自己的时间。这种时间是用他携带的时钟来测量的，这样航程对于空间旅行者比对于留在地球上的人显得更短暂是可能的。但是，这对于那些只老了几岁的返回的空间旅行者，并没有什么值得高兴的，因为他发现留在地球上的亲友们已经死去几千年了。这样，科学幻想作家为了使人们对他们的故事有兴趣，必须设想有朝一日我们能运动得比光还快。这些作家中的大部分并未意识到的是，如果你能运动得比光还快，相对论意味着，你就能向时间的过去运动，正如以下五行打油诗描写的那样：

有位年轻小姐名怀特，

她能行走得比光还快。

她以相对性的方式，

在当天刚刚出发，

却已在前晚到达。

关键在于相对论认为不存在让所有观察者同意的唯一的时间测量。相反，每位观察者各有自己的时间测量。如果一枚火箭能以低于光的速度从事件A（譬如2012年奥林匹克竞赛的100米决赛）至事件B（譬如比邻星议会第100004届会议的开幕式），那么根据所有观察者的时间，他们都同意事件A发生于事件B之先。然而，假定飞船必须以超过光的速度旅行才能把竞赛的消息送到议会。那么，以不同速度运动的观察者关于事件A和事件B何为前何为后就众说纷纭。按照一位相对于地球静止的观察者的时间，议会开幕也许是在竞赛之后。这样，这位观察者会认为，如果他不理光速限制的话，该飞船能及时地从A赶到B。然而，在比邻星上以接近光速在离开地球方向飞行的观察者就会觉得事件B即议会开幕，先于事件A即百米决赛发生。相对论告诉我们，对于以不同速度运动的观察者，物理定律是完全相同的。

这已被实验很好地检验过。人们认为，即使用更高级的理论去取代相对论，它仍然会被作为一个特性保留下来。这样，如果超光速旅行是可能的，运动的观察者会说，就有可能从事件B，也就是议会开幕式，赶到事件A，也就是百米竞赛。如果他运动得更快一些，他甚至还来得及在赛事之前赶回，并在得知谁是赢家的情形下放下赌金。

要打破光速壁垒存在一些问题。相对论告诉我们，飞船的速度越接近光速，用以对它加速的火箭功率就必须越来越大。对此我们已有实验的证据，但不是航天飞船的经验，而是在诸如费米实验室或者欧洲核子研究中心的粒子加速器中的基本粒子的经验。我们可以把粒子加速到光速的99.99%，但是不管我们注入多少功率，也不可能把它们加速到超过光速壁垒。航天飞船的情形也是类似的：不管火箭有多大功率，也不可能加速到光速以上。

这样看来，快速空间旅行和逆时旅行似乎都不可行了。然而，还可能有办法。人们也许可以把时空卷曲起来，使得A和B之间有一近路。在A和B之间创生一个虫洞就是一个法子。顾名思义，虫洞就是一个时空细管，它能把两个相隔遥远的几乎平坦的区域连接起来。

虫洞两个端点之间在几乎平坦的背景里的分离和通过虫洞本身的距离之间没必要有什么关系。这样，人们可以想象，他可以创造或者找到一个从太阳系附近通到比邻星的虫洞。虽然在通常的空间中地球和比邻

星相隔20万亿英里，而通过虫洞的距离却只有几百万英里。这就允许百米决赛的消息赶在议会开幕式前到达。然后一位往地球飞去的观察者也应该能找到另一个虫洞，使他从比邻星议会开幕在赛事之前回到地球。这样，虫洞正和其他可能的超光速旅行方式一样，允许人们逆时旅行。

时空不同区域之间的虫洞的思想并非科学幻想作家的发明，它的起源是非常令人尊敬的。

1935年爱因斯坦和纳珍·罗森写了一篇论文。在该论文中他们指出广义相对论允许他们称为“桥”，而现在称为虫洞的东西。爱因斯坦—罗森桥不能维持得足够久，使得航天飞船来得及穿越：虫洞会缩紧，而飞船会撞到奇点上去。然而，有人提出，一个先进的文明可能使虫洞维持开放。可以这样做，或者把时空以其他方式卷曲，使它允许时间旅行，人们可以证明，这需要一个负曲率的时空区域，如同一个马鞍面。通常的物质具有正能量密度，赋予时空以正曲率，如同一个球面。这样，为了使时空卷曲成允许逆时旅行的样子，人们需要负能量密度的物质。

能量有点像金钱：如果你有正的余额，就可以用不同方法分配，但是根据20世纪初相信的经典定律，你不允许透支。这样，这些经典定律排除了时间旅行的任何可能性。然而，正如在前面几章描述的，以不确定性原理为基础的量子定律已经超越了经典定律。量子定律更慷慨些，只要你总的余额是正的，你就允许从一个或两个账号透支。换言之，量子理论允许在一些地方的能量密度为负，只要它可由在其他地方的正的能量密度所补偿，使得总能量保持为正的。量子理论允许负能量密度的一个例子是所谓的卡西米尔效应。正如我们在第7章看到的，甚至我们认为是“空虚的”空间也充满了虚的粒子和反粒子对，它们一起出现相互分离，再返回一起，并且相互湮灭。现在，假定人们有两片距离很近的平行金属板，且金属板对于虚光子或光的粒子起着类似镜子的作用。事实上，在它们之间形成了一个空腔，它有点像风琴管，只对指定的音阶共鸣。这意味着，只有当平板间的距离是虚光子波长（相邻波峰之间的距离）的整数倍时，这些虚光子才会发生在平板之中的空间。如果空腔的宽度是波长的整数倍再加上部分波长，那么在前后反射多次后，一个波的波峰就会和另一个的波谷重合，这样波动就被抵消了。

因为平板之间的虚光子只能具有共振的波长，所以虚光子的数目比在平板之外的区域要略少些，在平板之外的虚光子可以具有任意波长。这样，撞击在平板内表面的虚光子比外表面的略少一些。因此，人们可

以预料到这两片平板遭受到把它们往里挤的力。实际上已经测量到这种力，并且和预言的值相符。这样，我们得到了虚粒子存在并具有实在效应的实验证据。

在平板之间存在更少虚光子的事实意味着，它们的能量密度比他处更小。但是在远离平板的“空虚的”空间的总能量密度必须为零，因为否则的话，能量密度会把空间卷曲起来，而不能保持几乎平坦。这样，如果平板间的能量密度比远处的能量密度更小，它就必须为负。

这样，我们对以下两种现象都获得了实验的证据。第一，从日食时的光线偏折得知时空可以被卷曲。第二，从卡西米尔效应得知时空可被弯曲成允许时间旅行的样子。所以，人们也许希望，随着科学技术的推进，我们最终能够造出时间机器。但是，如果这样的话，为什么从来没有一个来自未来的人回来告诉我们如何实现呢？鉴于我们现在处于初级发展阶段，也许有充分理由认为，让我们分享时间旅行的秘密是不明智的。除非人性得到彻底改变，否则非常难以相信，某位从未来飘然而至的访客会贸然泄漏天机。当然，有些人会宣称，观察到幽浮（UFO）就是外星人或者来自未来的人们来访的证据。（如果外星人在合理的时间内到达此地，他们则需要超光速旅行，这样两种可能性其实是等同的。）

然而，我认为，任何外星来的或者来自未来的人的造访应该是更明显得多，或许更加令人不悦得多。如果他们全然有意显灵的话，为何只对那些被认为不太可靠的证人进行？如果他们试图警告我们大难临头，这样做也不是非常有效的。

未曾有过对来自未来的访客，这可以用以下方法解释，因为我们观察了过去，并且发现它并没有允许从未来旅行返回必需的那类卷曲，所以过去是固定的。另一方面，未来是未知的开放的，所以也可能有需要的曲率。这意味着，任何时间旅行都被限制于未来。此时此刻，柯克船长和探险号星际飞船没有机会来临。

这也许可以解释，当今世界为何还没被来自未来的游客充斥。但是如果可能回到以前并改变历史，则不能够回避引起的问题。例如，假定你回到过去并且将你的曾曾祖父在他仍为孩童时杀死。这类佯谬有许多版本，但是它们根本上是等效的：如果一个人可以自由地改变过去，则他就会遇到矛盾。

看来有两种方法解决由时间旅行导致的佯谬。我把一种称为协调历史方法。它是讲，甚至当时空被卷曲得可能旅行到过去时，在时空中发生的必须是物理定律的协调的解。根据这个观点，除非历史表明，你曾经到达过去，并且当时并没有杀死你的曾曾祖父或者没有干过任何事和你的现状相冲突，你才能在时间中回到过去。此外，当你回到过去，你不能改变记载的历史。那表明你并没有自由意志为所欲为。当然，人们可以说，自由意志反正是虚幻的。如果确实存在一套制约万物的完整的统一理论，它也应该决定你的行动。但是对于像人这么复杂的机体，其制约和决定方式是不可能计算出来的。我们之所以说人们具有意志，乃在于我们不能预言他或她的未来行动。然而，如果一个人乘航天飞船出发并在这之前已经回返，我们就将能预言其未来行为，因为那将是记载的历史的一部分。这样，在这种情形下，时间旅行者没有自由意志。

解决时间旅行的其他可能的方法可称为选择历史假说。其思想是，当时间旅行者回到过去，他就进入和记载的历史不同的另外历史中去。这样，他们可以自由地行动，不受和原先的历史相一致的约束。史蒂芬·斯匹柏十分喜爱影片《回归未来》中的创意：玛提·马克弗莱能够回到过去，而且把他双亲恋爱的历史改得更令人满意。

听起来，选择历史假说和理查德·费恩曼把量子理论表达成历史求和的方法相类似，这已在第4章和第8章中描述过。这是说宇宙不仅仅有一个单独历史，它有所有可能的历史，每一个历史都有自己的概率。然而，在费恩曼的设想和选择历史之间似乎存在一个重要的差别。在费恩曼求和中，每一个历史都是由完整的时空和其中的每一件东西组成的。时空可以被卷曲成可能乘火箭旅行到过去。但是火箭要留在同一时空即同一历史中，因而历史必须是协调的。这样，费恩曼的历史求和设想似乎支持协调历史假说，而不支持选择历史假说。

费恩曼历史求和确实允许在微观的尺度下旅行到过去。我们在第9章看到，科学定律在CPT联合作用下不变。这表明，一个在反时钟方向自旋并从A运动到B的反粒子还可以被认为是在时钟方向自旋并从B运动回A的通常粒子。类似地，一个在时间中向前运动的通常粒子等价于在时间中往后运动的反粒子。正如在本章以及第7章讨论过的，“空虚的”空间充满了虚的粒子和反粒子对，它们一道出现、分离，然后回到一块并且相互湮灭。

这样，人们可以把这对粒子认为是在时空中沿着一个闭合圈环运动

的单独粒子。当这对粒子在时间中向前运动时（从它出现的事件出发到达它湮灭的事件），它被称为粒子。但是，当粒子在时间中往回运动时（从对湮灭的事件出发到达它出现的事件），可以说成反粒子在时间中向前运动。

在解释黑洞如何发射粒子并辐射（见第7章）时认为，虚的粒子/反粒子对中的一个成员（譬如反粒子）会落到黑洞中去，另一个失去和它湮灭的伙伴的成员留了下来。这个被抛弃的粒子也可以落入黑洞，但是它也可以从黑洞的邻近挣脱。如果这样的话，对于一位远处的观察者，它就作为从黑洞发射出的粒子而出现。

然而，人们对于黑洞辐射的机制可有不同的却是等价的图象。人们可以把虚对中的那个落入黑洞的成员（譬如反粒子）看成从黑洞出来的在时间中往回运动的粒子。当它到达虚粒子反粒子对一道出现的那一点，它被引力场散射成从黑洞逃脱的在时间中向前运动的粒子。相反，如果虚对中的粒子成员落入黑洞，人们也可以把它认为是从黑洞出来的在时间中往回运动的反粒子。这样，黑洞辐射表明，量子理论在微观尺度上允许在时间中的往回运动，而且这种时间旅行能产生可观测的效应。

因此产生这样的问题：量子理论在宏观尺度上允许时间旅行吗？这是人们能够利用的。初看起来，它应该是能够的。费恩曼历史求和的设想是指对所有的历史进行的。这样，它应包括被卷曲成允许旅行到过去的时空。那么，为什么我们并没有受到历史的骚扰？例如，假定有人回到过去，并把原子弹秘密提供给纳粹？

如果我称作时序防卫猜测成立的话，这些问题便可以避免。它是讲，物理学定律共谋防止宏观物体将信息传递到过去。它正如宇宙监督猜测一样，还未被证明，但是有理由相信它是成立的。

相信时序防卫有效的原因是，当时空被卷曲得可以旅行到过去时，在时空中的闭合圈环上运动的虚粒子，能够变成在时间前进的方向上以等于或者低于光速的速度运动的实粒子。由于这些粒子可以任意多次地围绕着圈环运动，它们通过路途中的每一点许多次。这样，它们的能量被再三地计入，使能量密度变得非常大。这也许赋予时空以正的曲率，因而不允许旅行到过去。这些粒子会引起正的还是负的曲率，或者由某种虚粒子产生的曲率是否被别种粒子产生的抵消，仍然不清楚。这样，

时间旅行的可能性仍然未决。但是我不准备为之打赌，我的对手或许具有通晓未来的不公平的优势。

第11章　物理学的统一

正如在第1章中所解释的，一蹴而就地建立一个包括宇宙中万物的完备统一理论是非常困难的。取而代之，我们在寻求描述有限范围事件的部分理论上取得了进步，这时我们忽略了其他效应，或者将它们用一定的数字来近似表示（例如，化学允许我们计算原子间的相互作用时，可以不管原子核内部的结构）。然而，最终人们希望找到一个完备的协调的，将所有这些部分理论当作它的近似的统一理论。在这理论中不需要为某些任意数选值去符合事实。寻找这样的一个理论被称之为“物理学的统一”。爱因斯坦用他晚年的大部分时间寻求一个统一理论，但是没有成功。因为尽管已有了引力和电磁力的部分理论，但关于核力还知道得非常少，所以时机还没成熟。并且，尽管他本人对量子力学的发展起过重要的作用，但他拒绝相信它的真实性。但是，不确定性原理似乎还是我们生活其中的宇宙的一个基本特征。因此，一个成功的统一理论必须将这个原理结合进去。

正如我将描述的，由于我们对宇宙知道得这么多，现在找到这样的一个理论的前景似乎是好得多了。但是我们必须小心，不要过分自信——我们在过去有过对成功的错误的期望！例如，在20世纪初，曾经以为任何东西都可以按照诸如弹性和热传导之类的连续物质的性质予以解释。原子结构和不确定性原理的发现使之彻底破产。然后又有一次，1928年物理学家诺贝尔奖获得者马克斯·玻恩告诉一群来格丁根大学的访问者：“据我们所知，物理学将在6个月之内结束。”他的信心是基于狄拉克新近发现的能够制约电子的方程。人们认为质子——这个当时仅知的另一种粒子——服从类似的方程，并且那将会是理论物理的终结。然而，中子和核力的发现对此又是当头一棒。尽管讲到这些，仍然有理由谨慎地乐观，我们现在也许已经接近探索自然终极定律的尾声。

在前几章中，我描述了引力的部分理论即广义相对论和制约弱力、强力和电磁力的部分理论。这后三种理论可以合并成为所谓的大统一理论（GUT）。这个理论并不令人非常满意，因为它没有包括引力，并且因为包含不能从理论预言，而必须人为选择以和观测符合的一些量，譬如不同粒子的相对质量，等等。要找到一个将引力和其他力统一的理论，主要困难在于广义相对论是一个“经典”理论；也就是说，它没有将

量子力学的不确定性原理结合进去。另一方面，其他的部分理论却以非常基本的形式依赖于量子力学。因此，第一步必须将广义相对论和量子力学结合在一起。正如我们已经看到的，这能产生一些显著的推论，例如黑洞不是黑的，宇宙没有任何奇点，是完全自足的并且没有边界。正如第7章解释的，麻烦在于，不确定性原理意味着甚至“空虚的”空间也充满了虚的粒子和反粒子对，这些粒子对具有无限的能量，并且由爱因斯坦的著名方程$E=mc^2$得知，这些粒子具有无限的质量。这样，它们的引力的吸引就会将宇宙卷曲到无限小的尺度。

相当类似地，在其他部分理论中也发生似乎荒谬的无限大。但是，所有这些情形下的无限大都可用称作重正化的过程消除掉。这牵涉到引入其他的无限大去消除这些无限大。虽然这个技巧在数学上颇令人怀疑，而在实际上似乎确实行得通，并用来和这些理论一起做出预言，这些预言极其精确地和观测一致。然而，从企图找到一个完备理论的观点看，由于不能从理论中预言，而相反地为了适合观测，必须选择质量和力的强度的实际值，因此重正化确实具有一个严重的缺陷。

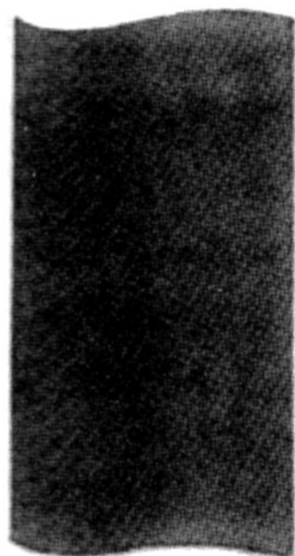
在试图将不确定性原理结合到广义相对论时，人们只有两个可以调整的量：引力强度和宇宙常数的值。但是调整它们不足以消除所有的无限大。因此，人们得到一个理论，它似乎预言了诸如时空的曲率的某些量真的无限大，但是观察和测量表明它们地地道道是有限的！人们对这个结合广义相对论和不确定性原理的问题怀疑了许久，直到1972年才被仔细地计算最后确证。4年之后，人们提出了一种叫作“超引力”的可能的解答。它的思想是将携带引力的自旋为2称为引力子的粒子和某些其他具有自旋为3/2、1、1/2和0的新粒子结合在一起。在某种意义上，所有这些粒子可认为是同一“超粒子”的不同侧面。这样就将自旋为1/2和3/2的物质粒子和自旋为0、1和2的携带力的粒子统一起来了。自旋1/2和3/2的虚的粒子反粒子对具有负能量，因此抵消了自旋为2、1和0的虚的粒子对的正能量。这就使得许多可能的无限大被抵消掉，但是人们怀疑，可能仍然保留了某些无限大。人们需要找出是否还遗存下未被抵消的无限大。然而，这计算是如此之冗长和困难，以致于没人准备着手去进行。即使使用一个计算机，预料至少要用4年工夫，而且犯至少一个或更多错误的机会是非常大的。这样，只有其他人重复计算，并得到同样的答案，人们才能判断已取得了正确的答案，但这似乎是不太可能的！

尽管这些问题，尽管超引力理论中的粒子似乎与观察到的粒子不相符合的这一事实，大多数科学家仍然相信，超引力可能是对于物理学统一问题的正确答案。看来它是将引力和其他力相统一起来的最好办法。然而，1984年人们的看法发生了显著的改变，他们更喜欢所谓的弦理论。在这些理论中，基本的对象不再是只占空间单独的点的粒子，而是只有长度而没有其他维，像是一根无限细的弦这样的东西。这些弦可以有端点（所谓的开弦），或它们可以自身首尾相接成闭合的圈子（闭弦）。一个粒子在每一时刻占据空间的一点。这样，它的历史可以在时空中用一根线代表（“世界线”）。另一方面，一根弦在每一时刻占据空间的一根线。这样它在时空里的历史是一个叫作世界片的二维面（在这世界片上的任一点都可用两个数来描述：一个指明时间，另一个指明这一点在弦上的位置）。一根开弦的世界片是一条带子：它的边缘代表弦的端点通过时空的路径（图11.1）。一根闭弦的世界片是一个圆柱或一个管（图11.2）：一个管的截面是一个圈，它代表在一特定时刻的弦的位置。

两根弦可以连接在一起，形成一根单独的弦；在开弦的情形下只要将它们的端点连在一起即可（图11.3）。在闭弦的情形下，像是两条裤腿合并成一条裤子（图11.4）。类似地，一根单独的弦可以分成两根弦。在弦理论中，原先以为是粒子的东西，现在被描绘成在弦里旅行的波动，如同振动着的风筝的弦上的波动。一个粒子从另一个粒子发射出来或者被吸收，对应于弦的分解和合并。例如，太阳作用到地球上的引力，在粒子理论中被描述成由太阳上的粒子发射出并被地球上的粒子吸收的引力子（图11.5）。在弦理论中，这个过程对应于一个H形状的管（图11.6）（在某种方面，弦理论有点像管道工程）。H的两个垂直的边对应于太阳和地球上的粒子，而水平的横杠对应于在它们之间旅行的引力子。









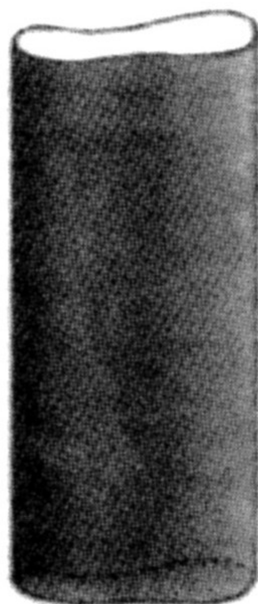


图11.1　　图11.2

弦理论有一个古怪的历史。它原先是20世纪60年代后期被发明出来，以试图找到一个描述强力的理论。其思想是，诸如质子和中子这样的粒子可被认为是一根弦上的波动。这些粒子之间的强力对应于连接其他一些弦之间的弦的片段，正如在蜘蛛网中一样。这弦必须像具有大约10吨拉力的橡皮带，才能使这理论给出粒子之间强力的观察值。

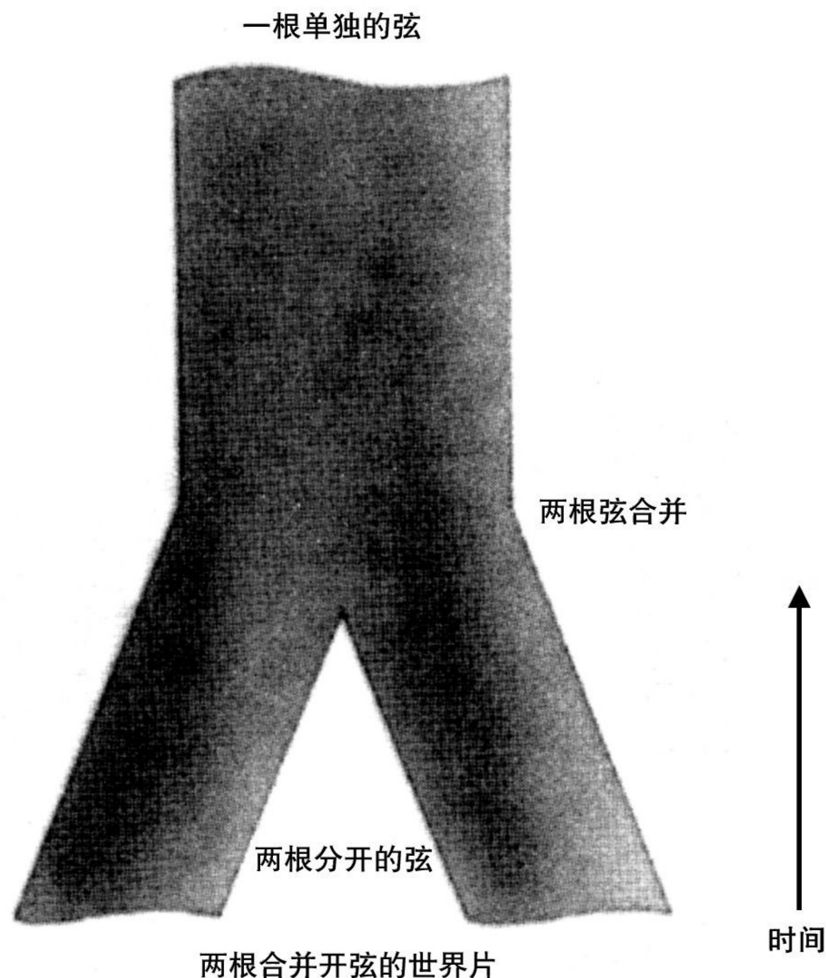


图11.3

1974年，巴黎的朱勒·谢尔克和加州理工学院的约翰·施瓦兹发表了一篇论文，指出弦理论可以描述引力，只不过其张力要大得多，大约是1000万亿亿亿亿（1后面跟39个0）吨。在通常尺度下，弦理论和广义相对论的预言是相同的，但在非常小的尺度下，比十亿亿亿亿分之一厘米（1厘米被1后面跟33个0除）更小时，它们就不一样了。然而，他们的工作并没有引起很大的注意，因为大约正是那时候，大多数人抛弃了原先的强作用力的弦理论，而倾心于基于夸克和胶子的理论，后者似乎和观测符合得更好。谢尔克死得很惨（他受糖尿病折磨，在周围没人给他注射胰岛素时昏迷死去）。这样一来，施瓦兹几乎成为弦理论的唯一支持者，只不过现在设想的弦张力要大得多而已。

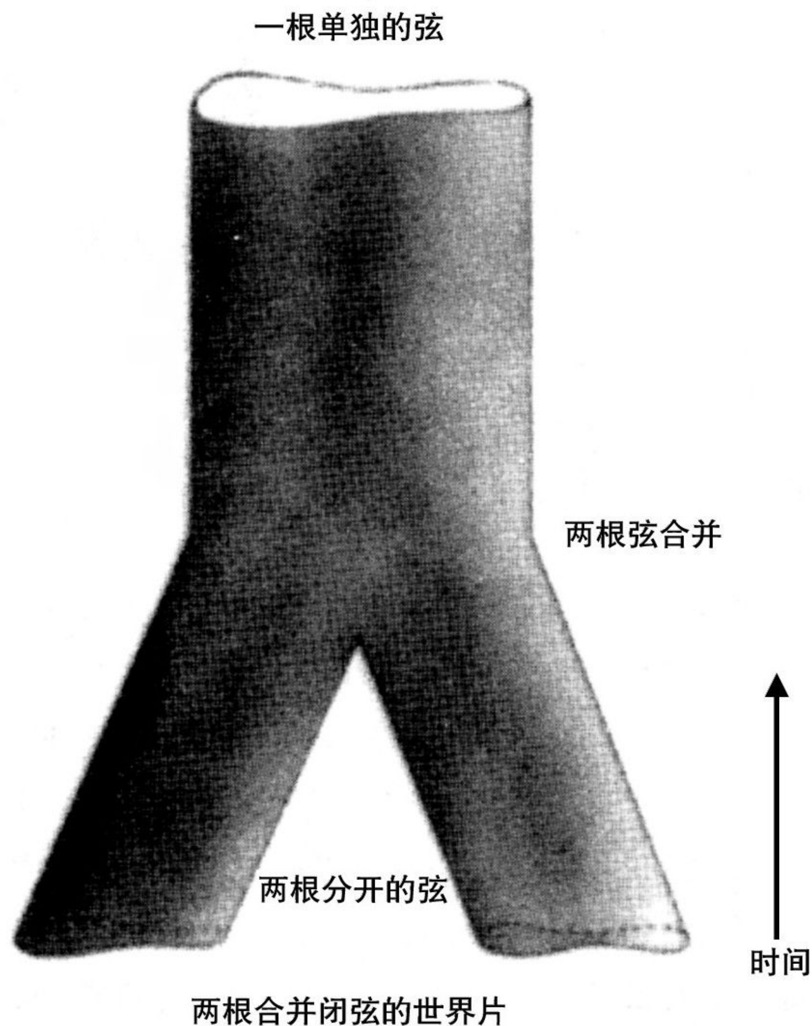


图11.4

1984年，由于两个明显的原因，人们对弦理论的兴趣突然复活。一个原因是，在证明超引力是有限的以及解释我们观察到的粒子的种类方面，人们未能真正取得进展。另一个原因是，约翰·施瓦兹和伦敦玛丽女皇学院的迈克·格林发表的一篇论文指出，弦理论可以解释内禀的左旋征性的粒子存在，正如我们观察到的一些粒子那样。不管什么原因，大量的人很快开始作弦理论的研究，而且发展了称之为杂化弦的新形式，这种形式似乎能够解释我们观测到的粒子类型。

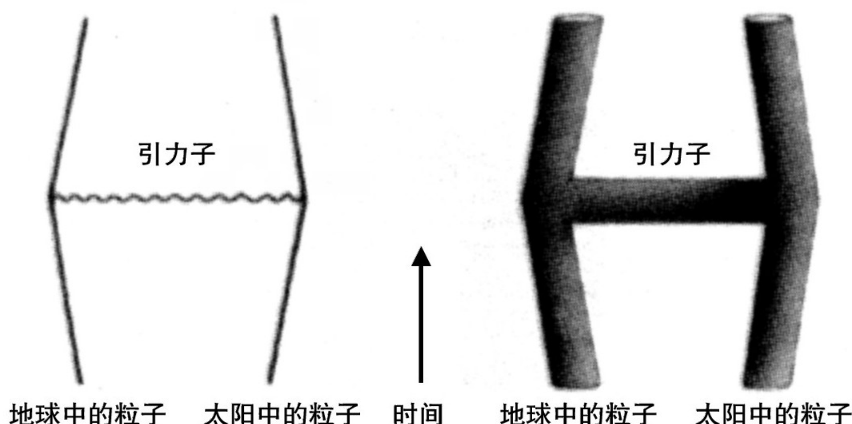


图11.5　　图11.6

弦理论也导致无限大，但是人们认为，它们在一些像杂化弦的形式中会被消除掉（虽然这一点还没被确认）。然而，弦理论有更大的问题：似乎时空是十维或二十六维，而不是通常的四维时它们才是协调的！当然，额外的时空维的确是科学幻想的老生常谈；它们提供了克服广义相对论的通常限制的理想方法，即人们不能行进得比光更快或者旅行到过去的限制（见第10章）。其思想是穿过更高的维抄近路。你可用以下方法描绘这一点。想象我们生活的空间只有二维，并且弯曲成像一个锚圈或环的表面（图11.7）。如果你处在这环的内侧的一边，而要跨过环到另一侧的一点去，你必须沿着环的内边缘上的圆圈走，直到目标点。然而，你如果允许在第三维空间里旅行，你可以直接穿过去。

如果这些额外的维确实存在，为什么我们全然没有觉察到它们呢？为何我们只看到三个空间维和一个时间维呢？人们的看法是，其他的维被弯卷到非常小的尺度——大约为一百万亿亿亿分之一英寸的空间，人们根本无从觉察这么小的尺度：我们只能看到一个时间维和三个空间维，在这些维中时空是相当平坦的。这正如一根麦秸的表面。如果你近看它，就会发现它是二维的（要用两个数来描述麦秸上的点，一个是沿着麦秸的长度，另一个是围绕着圆周方向的距离）。但是，当你远看它时，你分辨不出它的粗细，而它就显得是一维的（只用沿麦秸的长度来指明点的位置）。对于时空亦是如此：在非常小的尺度下，时空是十维的，并且是高度弯曲的，但是在更大的尺度下，你看不见曲率或者额外的维。如果这个图象是正确的，对于自愿的空间旅行者来讲可是个坏消息：额外的维实在是太小了，根本不允许航天飞船通过。然而，它引起

了另一个重要问题。为何一些而非所有的维都被卷曲成一个小球？也许在宇宙的极早期，所有的维都曾经非常弯曲过。为何一维时间和三维空间被摊平开来，而其他维仍然紧紧地卷曲着？

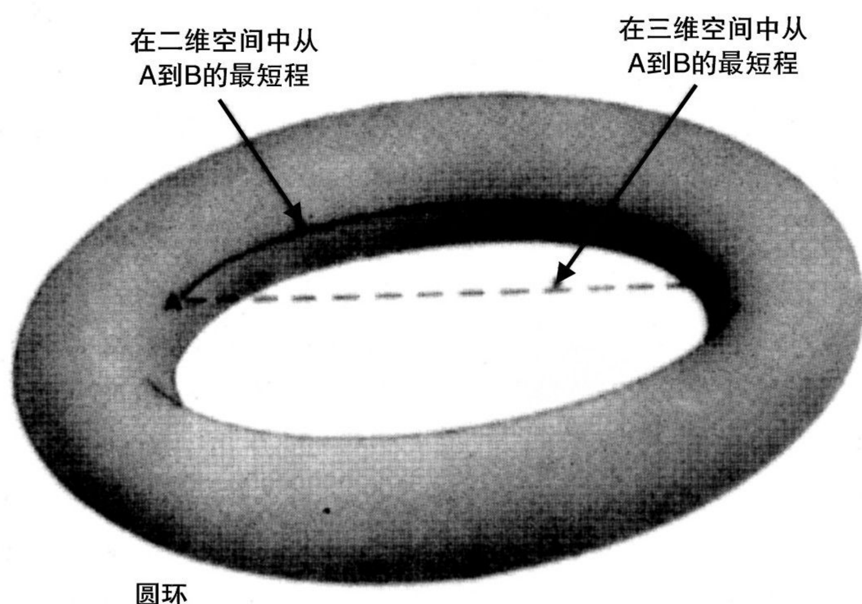


图11.7

人存原理可能提供一个答案。二维空间似乎不足以允许像我们这样复杂生命的发展。例如，在一维地球上生活的二维动物，为了相互通过，就必须一个爬到另一个之上。如果二维动物吃东西时不能将之完全消化，则它必须将其残渣从吞下食物的同样通道吐出来，因为如果有一个贯通全身的通道，它就将这生物分割成两个分开的部分：我们的二维动物就解体了（图11.8）。类似地，在二维动物身上实现任何血液循环都是非常困难的。

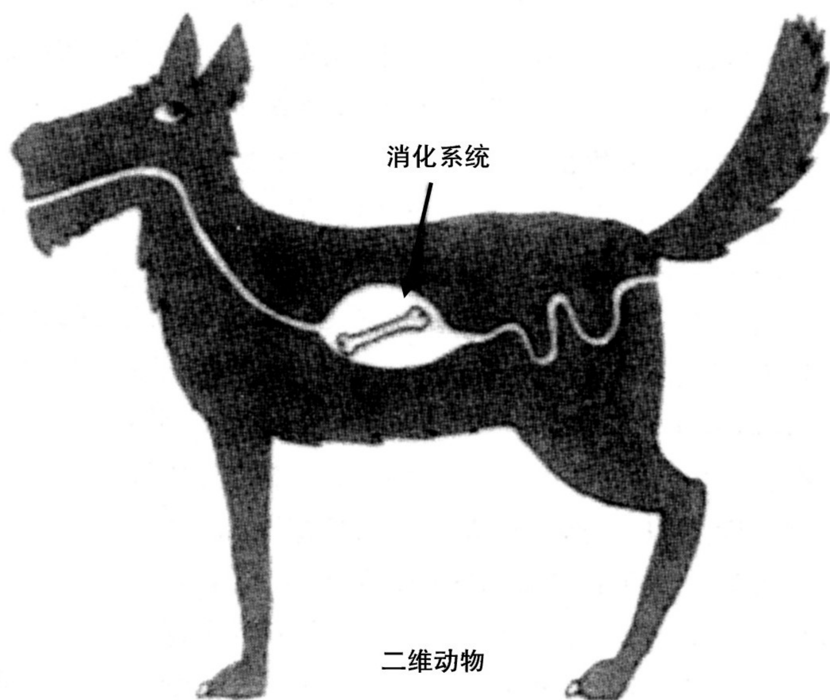


图11.8

多于三个空间维也有问题。两个物体之间的引力将随距离衰减得比在三维空间中更快（在三维空间内，如果距离加倍，则引力减少到1/4。在四维空间减少到1/8，五维空间1/16，等等）。其意义在于使像地球这样围绕着太阳的行星的轨道变得不稳定：地球偏离圆周轨道的最小微扰（例如由于其他行星的引力吸引）都会使它以螺旋线的轨道向外离开或向内落到太阳上去。我们就会被冻死或者被烧死。事实上，在维数多于三维的空间中，引力随距离变化的同样行为意味着，太阳不可能存在于压力和引力相平衡的稳定的状态下，它要么被四分五裂，要么坍缩形成一个黑洞。在任一种情况下，对地球上的生命来说，它作为热和光的来源都没有多大用处。在小尺度下，原子里使电子围绕着原子核运动的电力行为正和引力一样。这样，电子要么全部从原子逃逸出去，要么沿螺旋的轨道落到原子核上去。在任一种情形下，都不存在我们知道的原子。

看来很清楚，至少如我们所知，生命只能存在于一维时间和三维空间没被卷曲得很小的时空区域里。这表明，只要人们可以证明弦理论至少允许宇宙存在这样的区域——似乎弦理论确实能做到这一点，则我们

可以求助弱人存原理。同样，也会存在宇宙的其他区域或其他宇宙（不管那是什么含义），那里所有的维都被卷曲得很小，或者多于四维几乎是平坦的，但是在这样的区域里，不会有智慧生物去观察这不同数目的有效维数。

另一个问题是至少存在四种不同的弦理论（开弦和三种不同的闭弦理论），以及由弦理论预言的额外维的极其繁多的卷曲方式。为何自然只挑选一种弦理论和一种卷曲方式？这问题一度似乎没有答案，因而无法向前进展。后来，大约从1994年开始，人们开始发现所谓的对偶性：不同的弦理论以及额外维的不同卷曲方式会导致四维时空中的同样结果。不仅如此，正如在空间中占据单独一点的粒子，也像空间中线状的弦，还存在另外称作p膜的东西，它在空间中占据二维或更高维的体积（粒子可认为是0膜，而弦为1膜，但是还存在p从2到9的p膜）。这似乎表明，在超引力、弦以及p膜理论中存在某种民主：它们似乎和平相处，没有一种比另一种更基本。看起来，它们是对某种基本理论的不同近似，这些近似在不同的情形下成立。

人们探索了这个基本理论，但是迄今毫无成就。正如哥德尔指出，不可能用单独的一族公理系统来表述算术。我相信这里的情形不可能比它更好，基本理论不可能存在单独的表述。相反，它也许和地图类似。你不可能只用一张单独的地图去描述地球或者锚圈的表面：在地球的情形下，你至少需要两张地图去覆盖每一点，而在锚圈的情形下，则需要四张。每张地图只对一个有限的区域有效，但是不同的地图有一个交叠的区域。整族地图就为该表面提供了完整的描述。类似地，在物理学中对不同的情形需要使用不同的表述，但是两种不同表述在它们都适用的情形下要相互一致。整族不同的表述可以被认为是完备的统一理论，尽管它不是依照单独的假设集合表达的理论。

但是，确实存在一个这样的统一理论吗？或者我们也许仅仅是在追求海市蜃楼。似乎存在三种可能性：

（1）确实存在一个完备的统一理论（或者一族交叠的表述），如果我们足够聪明的话，总有一天会找到它。

（2）并不存在宇宙的最终理论，仅仅存在一个越来越精确地描述宇宙的无限的理论序列。

（3）并不存在宇宙的理论：不可能在一定程度之外预言事件，事件仅以一种随机或任意的方式发生。

有些人基于以下理由赞同第三种可能，如果存在一族完备的定律，这将侵犯上帝改变其主意并对世界进行干涉的自由。这有点像那古老的二律背反：上帝能制造一个重到连自己都不能将其举起的石块吗？但是上帝可能要改变主意的这一思想，正如圣·奥古斯丁指出的，是一个想象上帝存在在时间里的虚妄的例子：时间只是上帝创造的宇宙的一个性质。可以设想，当他创造宇宙时，他就知道了自己所有的企图！

随着量子力学的发现，我们认识到，由于总存在一定程度的不确定性，因此，不可能完全精确地预言事件。如果有人愿意，他可以将此随意性归结为上帝的干涉。但这会是一种非常奇怪的干涉：没有任何证据表明它具有任何目的。的确，如果它有目的，则按定义就不是随意的。现代由于我们重新定义科学的目标，所以已经有效地排除了上述的第三种可能性：我们的目的只在于表述一族定律，这些定律能使我们在不确定性原理的极限之内预言事件。

第二种可能性，也就是存在一无限的越来越精确的理论序列，是和迄今为止我们的经验相符合的。在许多场合我们增加了测量的灵敏度，或者进行了新的类型的观测，只是为了发现还没被现有理论预言的新现象，为了解释这些，我们必须发展更高级的理论。现代的大统一理论预言：在大约100吉电子伏的弱电统一能量和大约1000万亿吉电子伏的大统一能量之间，没有什么本质上新的现象发生。因此，如果这个预言是错的话，人们并不会感到非常惊讶。我们的确可以预期发现一些新的比夸克和电子——这些我们目前以为是“基本”粒子——更基本的结构层次。

然而，引力似乎可以为这个“盒子套盒子”的序列设下极限。如果人们有一个具有比1000亿亿（1后面跟19个0）吉电子伏的所谓普朗克能量更高能量的粒子，它的质量就会集中到如此的程度，它就会脱离宇宙的其他部分，而形成一个小黑洞。这样看来，当我们往越来越高的能量去的时候，越来越精密的理论序列确实应当有某一极限，所以必须有宇宙的终极理论。当然，普朗克能量离开大约100吉电子伏——目前在实验室中所能产生的最大的能量——非常远，我们不可能在可见的未来用粒子加速器填补其间的差距！然而，宇宙的极早期阶段是这样大能量必定发生的舞台。我以为，早期宇宙的研究和数学协调性的要求，很有可

能会导致当今我们周围的某些人在有生之年获得一个完备的统一理论。当然，这一切都是假定我们首先不使自身毁灭的前提下而言的。

如果我们确实发现了宇宙的终极理论，这意味着什么？正如在第1章中解释的，因为理论不能被证明，我们将永远不能肯定，我们是否确实找到了正确的理论。但是如果理论在数学上是协调的，并且总是给出与观察一致的预言，我们便可以适度地相信它是正确的。它将给人类理解宇宙的智力斗争长期而光辉的历史篇章打上一个休止符。但是，它还会变革常人对制约宇宙定律的理解。在牛顿时代，一个受教育的人至少可能在梗概上掌握整个人类知识。但从那以后，科学发展的节奏使之不再可能。因为理论总是被改变以解释新的观察结果，它们从未被消化或简化到使常人能够理解。你必须是一个专家，即使如此，你只能有望正确地掌握科学理论的一小部分。另外，其发展的速度如此之快，在中学和大学所学的总是有点过时。只有少数人可以跟得上知识快速进步的前沿，但他们必须贡献毕生的精力，并局限在一个小的领域里。其余的人对于正在进行的发展或者它们产生的激动只有很少的概念。70年前，如果爱丁顿的话是真的，那么只有两个人理解广义相对论。今天，成千上万的大学生、研究生能理解，并且几百万人至少熟悉这个思想。如果发现了一套完备的统一理论，以同样方法将其消化并简化，以及在学校里至少讲授其梗概，这只是时间的迟早问题。我们那时就都能够对制约宇宙，并对我们的存在负责的定律有所理解。

即使我们发现了一个完备的统一理论，由于两个原因，这并不表明我们能够一般地预言事件。第一是量子力学不确定性原理给我们的预言能力设立的限制。对此我们无法克服。然而，在实际上更为严厉的是第二个限制。它是由以下事实引起的，除了非常简单的情形，我们不能准确解出这理论的方程。（在牛顿引力论中，我们甚至连三体运动问题都不能准确地解出，而且随着物体的数目和理论复杂性的增加，困难愈来愈大。）除了在最极端条件下之外，我们已经知道规范物体在所有条件下的行为的定律。特别是，我们已经知道作为所有化学和生物基础的基本定律。我们肯定还没有将这些学科归结为可解问题的状态：到现在为止，我们在根据数学方程来预言人类行为上只取得了很少的成功！所以，即使我们确实找到了基本定律的完备集合，在未来的岁月里，我们仍面临着在智慧上挑战性的任务，那就是发展更好的近似方法，使得在复杂而现实的情形下，能作出对可能结果的有用预言。一个完备的协调的统一理论只是第一步：我们的目标是完全理解发生在我们周围的事件

以及我们自身的存在。

第12章　结论

我们发现自己处于令人困惑的世界中。我们要理解周围所看到的一切的含义，并且寻问：宇宙的本质是什么？我们在其中的位置如何，以及宇宙和我们从何而来？宇宙为何是这个样子？

我们试图采用某种世界图来回答这些问题。如同一个无限的乌龟塔背负平坦的地球是这样的图象一样，超弦理论也是一种图象。虽然后者比前者更数学化，更准确得多，但两者都是宇宙的理论。两个理论都缺乏观测的证据：没人看到一个背负地球的巨龟，但也没有人看到超弦。然而，龟理论作为一个好的科学理论是不够格的，因为它预言了人会从世界的边缘掉下去。除非可以用它解释人们在百慕大三角消失的传说，否则这个理论和经验不一致！

最早在理论上描述和解释宇宙的企图牵涉到这样一种思想：具备人类情感的灵魂控制着事件和自然现象，它们的行为和人类非常相像，并且是不可预言的。这些灵魂栖息在自然物体，诸如河流、山岳以及包括太阳和月亮这样的天体之中。我们必须向它们祈祷并供奉，以保证土壤肥沃和四季循环。然而，我们逐渐注意到一些规律：太阳总是东升西落，而不管我们是否用牺牲向太阳神供奉。此外，太阳、月亮和行星沿着可事先被预言得相当准确的轨道穿越天穹。太阳和月亮仍然可以是神祇，只不过是服从严格定律的神祇。如果你不将约书亚书停止太阳运行之类的神话信以为真，则这一切显然是毫无例外的。

最初，只有在天文学和其他一些情形下，这些规律和定律才是显而易见的。然而，随着文明的发展，特别是近300年间，越来越多的规律和定律得到发现。这些定律的成功，使得拉普拉斯在19世纪初提出科学的决定论；也就是他提议的，有一族定律存在，只要给定宇宙在某一时刻的状态，这些定律就能精确决定宇宙的演化。

拉普拉斯的决定论在两个方面是不完整的：它没讲应该如何选择定律，也没指定宇宙的初始状态。这些都留给了上帝。上帝会选择让宇宙如何开始并要服从什么定律，但是一旦开始之后，他将不再干涉宇宙。事实上，上帝被局限于19世纪科学不能理解的领域里。

我们现在知道，拉普拉斯对决定论的希望，至少按照他所想的方式，是不能实现的。量子力学的不确定性原理意味着，某些成对的量，比如粒子的位置和速度，不能同时被完全精确地预言。量子力学通过一类量子理论来处理这种情形，在这些理论中粒子没有精确定义的位置和速度，而是由一个波来代表。这些量子理论给出了波随时间演化的定律，在这种意义上，它们是宿命的。于是，如果我们知道某一时刻的波，我们便可以将它在任一时刻推算出。只是当我们试图按照粒子的位置和速度对波做解释的时候，不可预见性的随机的要素才出现。但这也许是我们的错误：也许不存在粒子的位置和速度，只有波。只不过是我们企图将波硬套到我们关于位置和速度的先入为主的观念之上而已。由此导致的不协调乃是表面上不可预见性的原因。

事实上，我们已经将科学的任务重新定义为，发现能使我们在由不确定性原理设定的界限内预言事件的定律。然而，还存在如下问题：如何或者为何选取宇宙的定律和初始状态？

我在本书中特地突出制约引力的定律，因为正是引力使宇宙的大尺度结构成形，即使它是四类力中最弱的一种。引力定律和直到相当近代还为人深信的宇宙在时间中不变的观念不相协调：引力总是吸引，这一事实意味着，宇宙的演化方式两者必居其一，要么正在膨胀，要么正在收缩。按照广义相对论，宇宙在过去某一时刻肯定有一个具有无限密度的状态，亦即大爆炸，这是时间的有效起始。类似地，如果整个宇宙坍缩，在将来必有另一个无限密度的状态，亦即大挤压，这是时间的终结。即使整个宇宙不坍缩，在任何坍缩形成黑洞的局部区域里都会有奇点。这些奇点正是任何落进黑洞的人的时间终点。在大爆炸时和其他奇点，所有定律都失效，所以上帝仍然有完全的自由去选择发生了什么以及宇宙如何开始。

当我们将量子力学和广义相对论结合，似乎产生了前所未有的新的可能性：空间和时间一起可以形成一个有限的四维的没有奇点或边界的空间，这正如地球的表面，但具有更多的维。看来这种思想能够解释宇宙间已观察到的许多特征，诸如它的大尺度一致性，还有包括星系、恒星甚至人类等在小尺度上对此均匀性的偏离。但是，如果宇宙是完全自足的，没有奇点或边界，并且由统一理论完全描述，那么就对上帝作为造物主的作用有深远的意义。

有一次爱因斯坦问道：“在建造宇宙时上帝有多少选择性？”如果无

边界假设是正确的，上帝就根本没有选择初始条件的自由。当然，上帝仍有选择宇宙所服从的定律的自由。然而，这也许实在并没有那么多选择性；很可能只有一个或数目很少的完备的统一理论，例如弦论，它们是自洽的，并且允许像人类那样复杂结构的存在，这些结构能够研究宇宙定律并询问上帝的本性。

即使只有一种可能的统一理论，那也只不过是一组规则和方程而已。是什么赋予这些方程以活力去制造一个为它们所描述的宇宙呢？通常的科学方法，即建立一个数学模型，不能回答为什么会有一个为此模型所描述的宇宙这个问题。为什么宇宙要找这么多存在的麻烦？难道统一理论如此咄咄逼人，以至于其自身之实现不可避免？或者它需要一个造物主，若是这样，它对宇宙还有其他效应吗？又是谁创造了它？

迄今为止，大部分科学家太忙于发展描述宇宙为何物的理论，以至于没工夫过问为什么。另一方面，以寻根究底为己任的哲学家跟不上科学理论的进步。在18世纪，哲学家把包括科学在内的整个人类知识当作他们的领域，并讨论诸如宇宙有无开端的问题。然而，在19世纪和20世纪，对哲学家或除了少数专家以外的任何人来说，科学变得过于专业性和数学化了。哲学家把他们的质疑范围缩小到如此程度，以至于连维特根斯坦，这位20世纪最著名的哲学家都说道：“哲学余下的任务仅是语言分析。”这是从亚里士多德到康德哲学的伟大传统的何等堕落啊！

如果我们确实发现了一个完备的理论，在主要的原理方面，它应该及时让所有人理解，而不仅仅让几个科学家理解。那时我们所有人，包括哲学家、科学家以及普普通通的人，都能参与讨论我们和宇宙为什么存在的问题。如果我们对此找到了答案，则将是人类理性的终极胜利——因为那时我们知道了上帝的精神。

阿尔伯特·爱因斯坦

爱因斯坦与核弹政治的瓜葛是众所周知的：他签署了那封著名的致富兰克林·罗斯福总统的信，说服美国认真考虑他的想法，并且他在战后致力于阻止核战争的爆发。但是，这些不仅仅是一位科学家被拖入政界的孤立行动。事实上，用爱因斯坦自己的话来说，他的一生“一半用于政治，一半用于方程”。

爱因斯坦最早从事政治活动是在第一次世界大战期间，当时他在柏林当教授。由于目睹草菅人命而不胜厌恶，他卷入了反战示威。他拥护非暴力反抗以及公开鼓励人民拒绝服兵役，因而不受他的同事们欢迎。后来，在战时，他又致力于调解和改善国际关系。这也使他不受欢迎，而且他的政治态度很快使他难以访问美国，甚至连讲学都有困难。

爱因斯坦第二个伟大的事业是犹太复国主义。虽然他在血统上是犹太人，但他拒绝接受《圣经》上关于上帝的说法。然而，在第一次世界大战之前和期间，他逐渐意识到反犹主义，这导致他参加犹太团体，而后成为一个直言不讳的犹太复国主义的拥护者。再度不受欢迎也未能阻止他发表自己的主张。他的理论开始受到攻击，甚至有人成立了一个反爱因斯坦的组织。有一个人因教唆他人去谋杀爱因斯坦而被定罪（却只罚了6美元）。但爱因斯坦是冷静的。当一本题为《100个反爱因斯坦的作家》的书出版时，他反驳道：“如果真是我错了的话，有一个人反对我就足够了！”

1933年，希特勒上台了。爱因斯坦正在美国，他宣布不再回德国。后来纳粹冲锋队查抄了他的房子，并没收了他的银行存款。一家柏林报纸的头条写道：“来自爱因斯坦的好消息——他不回来了。”面对着纳粹的威胁，爱因斯坦放弃了和平主义，由于担心德国科学家会制造核弹，他终于建议美国应该发展自己的核弹。但是，甚至在第一枚原子弹爆炸之前，他就曾经公开警告过核战争的危险，并提议对核武器进行国际控制。

终其一生，爱因斯坦致力于和平的努力可能成效甚微——肯定不受欢迎。然而，1952年他得到担任以色列总统的提议，他对犹太复国主义事业的畅言无忌的支持得到了充分的承认。但他谢绝了。他说他认为自

己在政治上过于天真。可是，也许他真正的理由却并非如此，再次引用他自己的话：“方程对我而言更重要些，因为政治是为当前，而方程却是永恒的东西。”

伽利略·伽利雷

伽利略可能比任何其他人更有资格称为近代科学的奠基人。他与天主教会名闻遐迩的冲突对他的哲学是极重要的，因为伽利略是最早作出如下论断的人之一：人类有望理解世界如何行为，而且我们能通过观察现实世界来做到这一点。

伽利略很早就相信哥白尼理论（即行星围绕太阳公转），但只有当他发现了支持这一观念的证据后，才公开支持。他用意大利文写有关哥白尼理论的文章（没有用通常的学院式拉丁文），并且他的观点很快就广泛地传播到大学之外。这惹怒了亚里士多德派的教授们，他们联合起来反对他，并极力说服天主教会禁止哥白尼主义。

伽利略为此担心，他赶到罗马去向天主教会当局当面申诉。他争辩道，《圣经》并不试图告诉我们任何科学理论，而且通常都假定，在《圣经》和常识发生矛盾的地方，《圣经》是以讽喻的方式叙述的。

但是教会害怕这样的丑闻可能削弱它对新教的斗争，所以采取了镇压的手段。1616年，天主教会宣布哥白尼主义是“虚假的和错误的”，并命令伽利略再也不准“保卫或坚持”这一学说。伽利略勉强接受了。

1623年，伽利略的一位老友成为教皇。伽利略立即试图为1616年的判决翻案。他失败了，但他设法获得了准许，在两个前提下写一本讨论亚里士多德和哥白尼理论的书：他不能有倾向，同时要得出结论，无论如何人不能确定世界是如何运行的，因为上帝会以人难以想象的方式来达到同样的效果，而人类不能限制上帝的万能。

这本题为《关于两大世界体系的对话》的书，于1632年在审查官的全力支持下完成并出版了——并且立刻被全欧洲欢呼为文学和哲学的杰作。不久教皇就意识到，人们把这本书视为拥护哥白尼主义的令人信服的论证，后悔允许该书出版。教皇指出，虽有审查官正式批准出版该书，但伽利略依然违背了1616年的禁令。他把伽利略带到宗教法庭，宣布对他终身软禁，并命令他公开放弃哥白尼主义。伽利略第二次被迫服从。

伽利略仍然是一个忠实的天主教徒，但是他对科学独立的信仰从未动摇过。1642年，即他逝世前4年，当时他仍然被软禁着，他的第二本著作的手稿被偷运给一个荷兰的出版商。正是这本被称为《两种新科学》的书，甚至比支持哥白尼更进一步，成为现代物理学的发端。

艾萨克·牛顿

艾萨克·牛顿是一个不讨人喜欢的人，他和其他院士的关系声名狼藉，并在激烈的争吵中度过晚年的大部分时间。随着那部肯定是物理学有史以来最有影响的书——《自然哲学的数学原理》的出版，牛顿很快就成为名重一时的人物。他被任命为皇家学会主席，并成为第一个被授予爵位的科学家。

不久，牛顿就与皇家天文学家约翰·夫莱姆斯梯德发生冲突。他起初曾为牛顿《自然哲学的数学原理》一书提供急需的数据，但是他后来却扣压了牛顿需要的资料。牛顿是不许别人回答“不”字的，他自封为皇家天文台的大总管，然后强迫立即公布这些数据。最后，他指使夫莱姆斯梯德的冤家对头爱德蒙·哈雷夺取夫莱姆斯梯德的工作成果，并且准备出版。可是夫莱姆斯梯德告到法庭去，在最紧要关头赢得了法庭的判决——不得发行这部剽窃的著作。牛顿被激怒了，作为报复，他在《自然哲学的数学原理》后来的版本中系统地删除了所有来自夫莱姆斯梯德的引证。

他和德国哲学家哥特夫瑞德·莱布尼茨之间发生了更严重的争论。莱布尼茨和牛顿各自独立地发展了称作微积分的数学分支，它是大部分近代物理的基础。虽然现在我们知道，牛顿发现微积分要比莱布尼茨早若干年，可是他比莱布尼茨晚很久才出版他的著作。于是发生了关于谁是第一个发现者的大争吵，科学家们激烈地为双方作辩护。然而值得注意的是，大多数为牛顿辩护的文章均出自牛顿本人之手，虽然是以他朋友的名义出版！当争论日趋激烈时，莱布尼茨犯了向皇家学会起诉来解决争端的错误。牛顿作为其主席，指定一个清一色的由牛顿的朋友组成的“公正的”委员会来审查此案！更有甚者，牛顿后来自己写了一个委员会报告，并让皇家学会将其出版，正式地谴责莱布尼茨的剽窃行为。即便如此，牛顿心犹未足，他又在皇家学会的杂志上写了一篇匿名的、关于该报告的回顾。据报道，莱布尼茨死后，牛顿扬言他为“伤透了莱布尼茨的心”而洋洋得意。

在这两次争吵期间，牛顿已经离开剑桥和学术界。在剑桥他曾积极从事反天主教政治，后来在议会中也很活跃。最终，作为酬报，他得到

皇家造币厂厂长的肥差。在这里，他以社会上更能接受的方式，施展他那狡狯和刻薄的能耐，成功地导演了一场反对伪币的重大战役，甚至将几个人送上了绞刑架。

小辞典

绝对零度

所能达到的最低温度，在这温度下物体没有热能。

加速度

物体速度改变的速率。

人存原理

我们之所以看到宇宙是这个样子，是因为如果它不是这样的话，我们就不会在这里去观察它。

反粒子

每个类型的物质粒子都有相对应的反粒子。当一个粒子和它的反粒子碰撞时，两者就湮灭，只留下能量。

原子

通常物质的基本单元，是由很小的核子（包括质子和中子）以及围着它转动的电子构成。

大爆炸

宇宙开端的奇点。

大挤压

宇宙终结的奇点。

黑洞

时空的一个区域，因为那里的引力是如此之强，以至于任何东西，

甚至光都不能从该处逃逸出来。

卡西米尔效应

在真空中两片平行的平坦金属板之间的吸引压力。这种压力是由平板之间空间中的虚粒子的数目比正常数目减小而引起的。

昌德拉塞卡极限

一个稳定的冷星的可能的最大质量的临界值。比这质量更大的恒星，则会坍缩成一个黑洞。

能量守恒

关于能量（或它的等效质量）既不能产生也不能消灭的科学定律。

坐标

指定时空中一点的位置的一组数。

宇宙常数

爱因斯坦使用的一个数学手段，它赋予时空一个嵌入的膨胀倾向。

宇宙学

对整个宇宙的研究。

暗物质

在星系、星系团以及可能在星系团之间的物质，这种物质不能直接被观测到，但是可以由它的引力效应被检测到，宇宙中的质量多达90%可能处于暗物质的形式。

对偶性

导致相同的物理结果的，表面上不同的理论之间的对应。

爱因斯坦—罗森桥

连接两个黑洞的时空的细管。还请参见虫洞。

电荷

粒子的一个性质，由于这性质粒子排斥（或吸引）其他带有相同（或相反）符号电荷的粒子。

电磁力

在带电荷的粒子之间引起的力；它是四种基本力中第二强的力。

电子

带有负电荷并围绕着原子核转动的粒子。

弱电统一能量

大约为100吉电子伏的能量，在比这能量更大时，电磁力和弱力之间的差别消失。

基本粒子

被认为不可再分的粒子。

事件

由它的时间和位置所指明的在时空中的点。

事件视界

黑洞的边界。

不相容原理

两个相同的自旋为1/2的粒子（在不确定性原理设定的极限之内）不能同时具有相同的位置和速度。

场

某种充满空间和时间的东西，与它相反的是在一个时刻只在一点存在的粒子。

频率

对一个波而言，在1秒钟内完整循环的次数。

伽马射线

波长非常短的电磁射线，是由放射性衰变或由基本粒子碰撞产生的。

广义相对论

爱因斯坦基于如下思想的理论，即科学定律对所有的观察者，不管他们如何运动，都必须是相同的。它将引力解释成四维时空的曲率。

测地线

两点之间最短（或最长）的路径。

大统一能量

人们相信，在比这能量更大时，电磁力、弱力和强力之间的差别消失。

大统一理论（GUT）

一种统一电磁力、强力和弱力的理论。

虚时间

用虚数测量的时间。

光锥

时空中的面，在上面标出光通过一给定事件的可能方向。

光秒（光年）

光在1秒（1年）的时间里走过的距离。

磁场

引起磁力的场，现在和电场合并成电磁场。

质量

物体中物质的量；它的惯性，或对加速的抵抗。

微波背景辐射

起源于炽热的早期宇宙的灼热的辐射，现在它受到如此大的红移，以至于不以光而以微波（波长为几厘米的射电波）的形式呈现出来。

裸奇点

不被黑洞围绕的时空奇点。

中微子

只受弱力和引力影响的极轻的粒子。

中子

一种和质子非常类似的但不带电荷的粒子，在大多数原子的核中大约一半的粒子是中子。

中子星

在超新星爆发后，有时一个恒星中心的物质的核坍缩成一团密集的中子，这种余下的冷的恒星称做中子星。

无边界条件

宇宙是有限的但是没有边界的思想。

核聚变

两个核碰撞并合并形成单独的更重的核的过程。

核

原子的中心部分，只由质子和中子构成。在核中强作用力将质子和中子束缚在一起。

粒子加速器

一种利用电磁铁能够对运动的带电粒子加速，并给它们更多能量的机器。

相位

对一个波，特定的时刻在它循环中的位置：一种它是否在波峰、波谷或它们之间的某点的标度。

光子

光的一个量子。

普朗克量子原理

光（或任何其他经典的波）只能被发射或吸收分立的量子，其能量与它们频率成正比，和它们的波长成反比的思想。

正电子

电子的反粒子（带正电荷）。

太初黑洞

在极早期宇宙中产生的黑洞。

比例

“X”正比于“Y”表示当Y被乘以任何数时，X也如此；“X反比于Y”，表示当Y被乘以任何数时，X被那个数除。

质子

一种和中子非常类似的但带正电荷的粒子，在大多数原子的核中大约一半的粒子是质子。

量子力学

从普朗克量子原理和海森伯不确定性原理发展而来的理论。

脉冲量

发射出射电波规则脉冲的旋转中子星。

量子

波可被发射或吸收的不可分的单位。

量子色动力学

描述夸克和胶子相互作用的理论。

夸克

感受强作用力的（带电的）基本粒子。每一个质子和中子都由3个夸克组成。

雷达

利用脉冲射电波的单独脉冲到达目标并折回的时间间隔来测量对象位置的系统。

放射性

一种类型的原子核自动分裂成其他类型的原子核。

红移

由于多普勒效应，从离开我们而去的恒星发出的光线的红化。

奇点

时空中的一点，在该处时空曲率（或者一些其他的物理量）变得无限大。

奇点定理

这定理是说，在一定情形下奇点必须存在，特别是宇宙必须起始于一个奇点。

时空

四维的空间，上面的点是事件。

空间维

三维中的任何一维——也就是除了时间维外的任何一维。

狭义相对论

爱因斯坦的基于如下思想的理论，即科学定律在没有引力现象时，对所有进行自由运动的观察者，无论他们的运动速度如何，都必须相同。

谱

构成一个波的分频率。太阳谱的可见光部分可以在彩虹中看见。

自旋

相关于但不等同于日常的自转概念的基本粒子的内部性质。

稳态

不随时间变化的态：一个以固定速率自转的球是稳定的，因为即便它不是静止的，在任何时刻它看起来都是等同的。

弦论

物理学的理论，在该理论中粒子被描述成弦上的波。弦具有长度，但没有其他维。

强力

4种基本力中最强的，作用距离最短的一种力。它在质子和中子中将夸克束缚在一起，并将质子和中子束缚在一起形成原子核。

不确定性原理

海森伯表述的一个原理，该原理说人们永远不能够精确地同时知道粒子的位置和速度；对其中的一个知道得越精确，则对另外一个就知道得越不精确。

虚粒子

在量子力学中，一种永远不能直接检测到的，但其存在确实具有可测量效应的粒子。

波/粒二象性

量子力学中的概念，认为在波和粒子之间没有区别；粒子有时可以像波一样行为，而波有时可以像粒子一样行为。

波长

在一个波中，两个相邻波谷或波峰之间的距离。

弱力

4种基本力中仅次于引力的第二弱的，作用距离非常短的一种力。

它作用于所有物质粒子，而不作用于携带力的粒子。

重量

引力场作用在物体上的力。它和质量成正比，但又不同于质量。

白矮星

一种由电子之间不相容原理排斥力所支持的稳定的冷的恒星。

虫洞

连接宇宙的遥远区域的时空细管。虫洞还可以连接到平行或婴儿宇宙，并且能够提供时间旅行的可能性。

感谢

史蒂芬·霍金

我在撰写本书时得到多人帮助。我的科学同仁毫无例外地激发我的灵感。在漫长的岁月里，我主要的合作者为罗杰·彭罗斯、罗伯特·格罗许、布兰登·卡特、乔治·埃里斯、盖瑞·吉朋斯、唐·佩奇和詹姆·哈特尔。他们有求必应，我非常感激他们，同时也非常感激我的学生们。

我的一名学生布里安·维特在准备初版时提供了许多帮助。矮脚鸡图书公司的编辑彼德·古查底还给我写下无数评语，使本书改善甚多。此外，我还想感谢安德鲁·杜恩，他为我修改了正文。

如果没有眼前的这台交流系统，本书就写不成。这套称作平衡器的软件是加利福尼亚兰卡斯特文字处理公司的瓦特·沃尔托兹捐赠的。我的语言合成器是加利福尼亚太阳谷的语音处理公司捐赠的。剑桥适用通信公司的大卫·梅森把合成器和手提电脑安装在我的轮椅之上。利用这个系统，我现在比我失声之前能更好地与人交谈了。

在我撰写和修改此书的年代里，有过许多秘书和助手。对于秘书们，我应特别感谢的有朱迪·费拉、安·拉弗、劳拉·珍翠、谢瑞尔·比林顿和苏·梅西。我的助手为柯灵·威廉斯、大卫·托马斯、雷蒙·拉夫勒蒙、尼克·菲利普、安德鲁·杜恩、斯图瓦·詹米森、约纳逊·布连奇利、提蒙·汉特、赛蒙·基尔、琼·罗杰斯和汤姆·肯达尔。尽管我是残疾的，但是我的护士、合作者、朋友以及家人们使我的生命非常充实并能进行研究。

第一推动丛书：宇宙系列

时间简史续编

[英] 史蒂芬·霍金 著

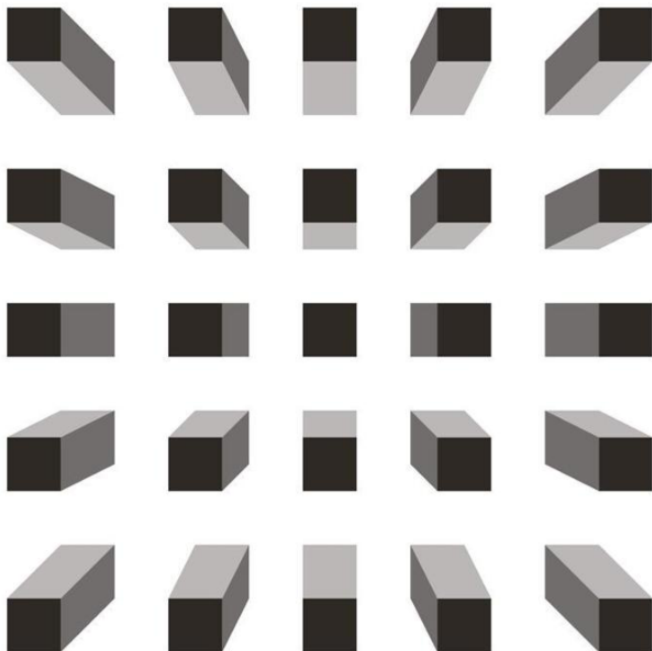
吴忠超 胡小明 译

The Cosmos Series

Stephen Hawking's A Brief History of Time

Stephen Hawking

THE FIRST MOVER



湖南科学技术出版社

版权信息

时间简史续编

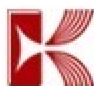
著者：（英）史蒂芬·霍金

译者：吴忠超　胡小明

责任编辑：李永平　吴炜　戴涛　杨波

装帧设计：邵年　李叶　李星霖　赵宛青

ISBN：9787535794574



湖南科学技术出版社
HUNAN SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS

目录

版权信息
总序
再版序 一个坠落苹果的两面：极端智慧与极致想象
前言
译者序
第1章
第2章
第3章
第4章
第5章
语录
跋
小辞典

总序

《第一推动丛书》编委会

科学，特别是自然科学，最重要的目标之一，就是追寻科学本身的原动力，或曰追寻其第一推动。同时，科学的这种追求精神本身，又成为社会发展和人类进步的一种最基本的推动。

科学总是寻求发现和了解客观世界的新现象，研究和掌握新规律，总是在不懈地追求真理。科学是认真的、严谨的、实事求是的，同时，科学又是创造的。科学的最基本态度之一就是疑问，科学的最基本精神之一就是批判。

的确，科学活动，特别是自然科学活动，比起其他的人类活动来，其最基本特征就是不断进步。哪怕在其他方面倒退的时候，科学却总是进步着，即使是缓慢而艰难的进步。这表明，自然科学活动中包含着人类的最进步因素。

正是在这个意义上，科学堪称为人类进步的“第一推动”。

科学教育，特别是自然科学的教育，是提高人们素质的重要因素，是现代教育的一个核心。科学教育不仅使人获得生活和工作所需的知识和技能，更重要的是使人获得科学思想、科学精神、科学态度以及科学方法的熏陶和培养，使人获得非生物本能的智慧，获得非与生俱来的灵魂。可以这样说，没有科学的“教育”，只是培养信仰，而不是教育。没有受过科学教育的人，只能称为受过训练，而非受过教育。

正是在这个意义上，科学堪称为使人进化为现代人的“第一推动”。

近百年来，无数仁人志士意识到，强国富民再造中国离不开科学技术，他们为摆脱愚昧与无知做了艰苦卓绝的奋斗。中国的科学先贤们代代相传，不遗余力地为中国的进步献身于科学启蒙运动，以图完成国人的强国梦。然而可以说，这个目标远未达到。今日的中国需要新的科学启蒙，需要现代科学教育。只有全社会的人具备较高的科学素质，以科

学的精神和思想、科学的态度和方法作为探讨和解决各类问题的共同基础和出发点，社会才能更好地向前发展和进步。因此，中国的进步离不开科学，是毋庸置疑的。

正是在这个意义上，似乎可以说，科学已被公认是中国进步所必不可少的推动。

然而，这并不意味着，科学的精神也同样地被公认和接受。虽然，科学已渗透到社会的各个领域和层面，科学的价值和地位也更高了，但是，毋庸讳言，在一定的范围内或某些特定时候，人们只是承认“科学是有用的”，只停留在对科学所带来的结果的接受和承认，而不是对科学的原动力——科学的精神的接受和承认。此种现象的存在也是不能忽视的。

科学的精神之一，是它自身就是自身的“第一推动”。也就是说，科学活动在原则上不隶属于服务于神学，不隶属于服务于儒学，科学活动在原则上也不隶属于服务于任何哲学。科学是超越宗教差别的，超越民族差别的，超越党派差别的，超越文化和地域差别的，科学是普适的、独立的，它自身就是自身的主宰。

湖南科学技术出版社精选了一批关于科学思想和科学精神的世界名著，请有关学者译成中文出版，其目的就是为了传播科学精神和科学思想，特别是自然科学的精神和思想，从而起到倡导科学精神，推动科技发展，对全民进行新的科学启蒙和科学教育的作用，为中国的进步做一点推动。丛书定名为“第一推动”，当然并非说其中每一册都是第一推动，但是可以肯定，蕴含在每一册中的科学的内容、观点、思想和精神，都会使你或多或少地更接近第一推动，或多或少地发现自身如何成为自身的主宰。

再版序　一个坠落苹果的两面：极端智慧与极致想象

龚曙光

2017年9月8日凌晨于抱朴庐

连我们自己也很惊讶，《第一推动丛书》已经出了25年。

或许，因为全神贯注于每一本书的编辑和出版细节，反倒忽视了这套丛书的出版历程，忽视了自己头上的黑发渐染霜雪，忽视了团队编辑的老退新替，忽视好些早年的读者已经成长为多个领域的栋梁。

对于一套丛书的出版而言，25年的确是一段不短的历程；对于科学研究的进程而言，四分之一个世纪更是一部跨越式的历史。古人“洞中方七日，世上已千秋”的时间感，用来形容人类科学探求的速律，倒也恰当和准确。回头看看我们逐年出版的这些科普著作，许多当年的假设已经被证实，也有一些结论被证伪；许多当年的理论已经被孵化，也有一些发明被淘汰……

无论这些著作阐释的学科和学说属于以上所说的哪种状况，都本质地呈现了科学探索的旨趣与真相：科学永远是一个求真的过程，所谓的真理，都只是这一过程中的阶段性成果。论证被想象讪笑，结论被假设挑衅，人类以其最优越的物种秉赋——智慧，让锐利无比的理性之刃，和绚烂无比的想象之花相克相生，相否相成。在形形色色的生活中，似乎没有哪一个领域如同科学探索一样，既是一次次伟大的理性历险，又是一次次极致的感性审美。科学家们穷其毕生所奉献的，不仅仅是我们无法发现的科学结论，还是我们无法展开的绚丽想象。在我们难以感知的极小与极大世界中，没有他们记历这些伟大历险和极致审美的科普著作，我们不但永远无法洞悉我们赖以生存世界的各种奥秘，无法领略我们难以抵达世界的各种美丽，更无法认知人类在找到真理和遭遇美景时的心路历程。在这个意义上，科普是人类极端智慧和极致审美的结晶，是物种独有的精神文本，是人类任何其他创造——神学、哲学、文学和

艺术无法替代的文明载体。

在神学家给出“我是谁”的结论后，整个人类，不仅仅是科学家，包括庸常生活中的我们，都企图突破宗教教义的铁窗，自由探求世界的本质。于是，时间、物质和本源，成为了人类共同的终极探寻之地，成为了人类突破慵懒、挣脱琐碎、拒绝因袭的历险之旅。这一旅程中，引领着我们艰难而快乐前行的，是那一代又一代最伟大的科学家。他们是极端的智者和极致的幻想家，是真理的先知和审美的天使。

我曾有幸采访《时间简史》的作者史蒂芬·霍金，他痛苦地斜躺在轮椅上，用特制的语音器和我交谈。聆听着由他按击出的极其单调的金属般的音符，我确信，那个只留下萎缩的躯干和游丝一般生命气息的智者就是先知，就是上帝遣派给人类的孤独使者。倘若不是亲眼所见，你根本无法相信，那些深奥到极致而又浅白到极致，简练到极致而又美丽到极致的天书，竟是他蜷缩在轮椅上，用唯一能够动弹的手指，一个语音一个语音按击出来的。如果不是为了引导人类，你想象不出他人生此行还能有其他的目的。

无怪《时间简史》如此畅销！自出版始，每年都在中文图书的畅销榜上。其实何止《时间简史》，霍金的其他著作，《第一推动丛书》所遴选的其他作者著作，25年来都在热销。据此我们相信，这些著作不仅属于某一代人，甚至不仅属于20世纪。只要人类仍在为时间、物质乃至本源的命题所困扰，只要人类仍在为求真与审美的本能所驱动，丛书中的著作，便是永不过时的启蒙读本，永不熄灭的引领之光。虽然著作中的某些假说会被否定，某些理论会被超越，但科学家们探求真理的精神，思考宇宙的智慧，感悟时空的审美，必将与日月同辉，成为人类进化中永不腐朽的历史界碑。

因而在25年这一时间节点上，我们合集再版这套丛书，便不只是为了纪念出版行为本身，更多的则是为了彰显这些著作的不朽，为了向新的时代和新的读者告白：21世纪不仅需要科学的功利，而且需要科学的审美。

当然，我们深知，并非所有的发现都为人类带来福祉，并非所有的创造都为世界带来安宁。在科学仍在为政治集团和经济集团所利用，甚至垄断的时代，初衷与结果悖反、无辜与有罪并存的科学公案屡见不鲜。对于科学可能带来的负能量，只能由了解科技的公民用群体的意愿

抑制和抵消：选择推进人类进化的科学方向，选择造福人类生存的科学发现，是每个现代公民对自己，也是对物种应当肩负的一份责任、应该表达的一种诉求！在这一理解上，我们将科普阅读不仅视为一种个人爱好，而且视为一种公共使命！

牛顿站在苹果树下，在苹果坠落的那一刹那，他的顿悟一定不只包含了对于地心引力的推断，而且包含了对于苹果与地球、地球与行星、行星与未知宇宙奇妙关系的想象。我相信，那不仅仅是一次枯燥之极的理性推演，而且是一次瑰丽之极的感性审美……

如果说，求真与审美，是这套丛书难以评估的价值，那么，极端的智慧与极致的想象，则是这套丛书无法穷尽的魅力！

是先有鸡呢，还是先有蛋？

宇宙有开端吗？

如果有的话，在此之前发生过什么？

宇宙从何处来，

又往何处去？

——史蒂芬·霍金

前言

史蒂芬·霍金

1992年1月

我写《时间简史》时最主要的目的，是要告诉大家在理解制约宇宙的定律方面当代最新的进展。如果能用一种简单的方式而且不用方程式来解释这些基本观念，我想别人也会和我一样感到兴奋和赞叹。我听说，每用一道方程式都会使书的销售数目减半。但是这没有关系。如果你要做统计就必须用到方程式，不过这些是数学枯燥的部分。大多数有趣的观念用文字或图画就能表达了。

我当然希望该书会成功并可获得适量的金钱。我在1982年开始写此书时，是想为我女儿的学费做些筹备。然而我从未想到这本书会这么成功。从1988年4月愚人节首版以来，此书已在世界各地被翻译成30种文字，并出售了大约550万册。这也就是说，在全世界平均每900个人拥有一册。为什么这些人都要买它呢？有许多人试图解释这种现象。有些意见认为，人们虽然买这本书，但是实际上并不读，懂的人就更少了。有人认为他们只是要让人家看到他们有这本书，或者又有人认为他们以拥有该书而感到自我安慰，因为不必努力阅读就能拥有知识。

也许我不是客观的仲裁者，但是我认为这不是全部真相。不管我到全世界的任何地方旅行，人们总会上前来告诉我，他们是如何的欣赏这本书。这些人都是一般人，不是爱赶时髦的那种人或是科学怪人。他们之中大多数似乎都读过这本书，有些人还读了许多遍。他们也许不能理解所读的每一处细节。如果他们能的话，就已经有资格开始攻读理论物理的博士学位了。但是，我希望他们感到与一些重大的物理问题之间并没有隔阂，而且如果他们努力一下就能理解得更多。我认为有些批评者过于自命不凡，贬低了一般大众。这些批评者自以为非常聪明：如果连他们都不能完全理解我的书，则凡人就更没指望了。

对于一本书而言，虽然销售550万册是伟大的成功，但仍然只触及一小部分人群。电影和电视才是接触更广大读者的唯一途径。这就是在

本书初版6个月后，高登·弗利曼找我来拍一部电影时，我也就欣然接受的原因。我曾想象这部影片会几乎全部是有关科学并附大量图解的纪录影片。然而，当他们开始制作时，整部影片像是全部变成有关我的生平的传记，而很少涉及科学。当我表示不满时，他们告诉我：你心目中的这类电影只能吸引少数人，为了吸引广大观众，必须把科学和你的生平结合在一起。我半信半疑。我以为这只是一个借口，用来达到拍摄传记片的目的，这是我早先曾否决过的事情。和导演埃洛尔·莫雷斯共事的经验使我信服：在电影界他算是凤毛麟角的相当正直的人。如果有任何人选能制作一部人人想看而又不失原书宗旨的电影，则非他莫属。

这本《时间简史续编》是为了提供背景知识给原书的读者或这部影片的观众。这本书比影片容纳了更多的资料，并包含影片中的照片和影片中科学思想的阐释。此书是原书之电影之书。我不知道，他们是否在计划一部原书之电影之书之电影。

译者序

吴忠超　胡小明

1992年4月25日

佛罗里达州罗德岱堡

宇宙学是当代发展最神速的尖端科学前沿之一。人类对宇宙的关注可以追溯到文明的开端，而人们对宇宙的神秘感可以说是与生俱来。霍金的《时间简史》在全世界受欢迎的程度便是最有力的证明。

当代宇宙学家经过十年的努力，建立了量子宇宙学的新学科。霍金和他的合作者提出的宇宙无边界设想是它的一块基石。它在双重意义上回应了宇宙学的挑战。第一，宇宙是包容一切的，在它的外面不能有任何东西，甚至应该说，它没有外面。第二，宇宙是唯一的，它不是可以任意赋予初始条件或边界条件的一般系统。宇宙的演化服从科学定律表明理论的自洽性，而宇宙的无边界性表明理论的自足性。

霍金和彭罗斯的奇性定理表明只能用量子引力来描述宇宙的创生。宇宙的波函数可以避免时空奇性。时空概念在宇宙之外没有任何意义，而在宇宙的开端遭受剧烈的改变。为了摒弃宇宙之外的观察者，人们还必须用退相干（decoherence）来解释为何我们观察到的时空是经典的，而抛弃半个世纪以来沿用的哥本哈根解释。宇宙学历来是孕育新观念和新思想的摇篮，它的每一个新成果都会对人类的传统产生震撼，这种现象将会贯穿于人类文明的整个过程。宇宙学当前面临的最大问题是宇宙的存在性。

作为宇宙学不可争议的权威，霍金的研究成就和生平一直吸引着广大的读者，影片《时间简史》和本书《时间简史续编》正由此应运而生。对于非科学专业的读者，这是享受人类文明成果的好机会。而对于各领域的专家，本书无疑是他们宝贵灵感的源泉之一。这就是我们翻译本书的初衷。

第1章

1942年1月，在法兰克·霍金和伊莎贝尔·霍金的第一个孩子即将降生之际，纳粹空军正狂轰滥炸英格兰的城市。伦敦几乎夜夜不停地遭受到空袭。这迫使霍金一家，为了使他们的孩子能在一块安全乐土上诞生，搬离海格特的家园，而迁到牛津避难。

他们在史蒂芬诞生后又回到了伦敦，一直在那里住到1950年。后来他们搬到伦敦北部20英里（1英里≈1.6千米）的教堂城——圣阿尔班斯，她在那里把史蒂芬、玛丽（出生于1943年）、费利珀（出生于1946年）和爱德华（出生于1955年）抚养长大。

伊莎贝尔·霍金

我们非常幸运，实在非常幸运——我是指我们一家，包括史蒂芬和每一个人。人人都饱受灾难，但重要的是我们活了下来，而有些人却从此音信杳然。

飞行中的炸弹是非常恐怖的。它们在天空吱吱作响，突然间沉寂了下来。这时你就开始估算它花多长时间落下。我忘记了这个时间的长短。倘若你听到爆炸声，你就意识到没被炸着，便可以安然无恙地回家吃饭或做点别的。



伊莎贝尔·霍金是史蒂芬·霍金的母亲，她已年近八十。史蒂芬的外祖母生了7个孩子，祖母生了包括史蒂芬的父亲法兰克·霍金一共5个孩子。在霍金家族的最后一次团聚中共有83名成员出席。法兰克·霍金于1986年去世，他是英国药物研究所的医生兼热带病生物学家。20世纪30年代，伊莎贝尔在牛津研究哲学、政治和经济学

所以，我们决定史蒂芬最好是在牛津出世。我在产前一周就到了牛津。我们先去找一个旅馆，但是他们说："你随时都可能生产，所以不能待在这里。"所以我必须搬到医院去。我在医院时，做了一些工作，而且得到一张书券，所以就去布勒克威尔书店买了一本星象图。

我的小姑说："你做这件事情真是未卜先知。"

史蒂芬·霍金

我出生于1942年1月8日，刚好是伽利略逝世300周年后的同一天。然而，我估计了一下，大约有20万个婴儿在同一天诞生，不知道其中有

没有后来对天文学感兴趣的人。

尽管我的父母亲在伦敦生活，我却是在牛津诞生的。这是因为牛津在战时是个出生的好地方：德国人同意不轰炸牛津和剑桥，英国以不轰炸海德堡和哥廷根作为回报。可惜的是，这类文明的措施不能扩及更大的范围。

我父亲是在约克郡长大的。他的父母在20世纪初破产了，但还是设法把他送到牛津学医。我母亲在苏格兰格拉斯哥诞生，和我父亲的家庭一样并不富裕。尽管如此，他们还是把她送到了牛津。

在牛津学习结束后，她做过各式各样的事，包括她所不喜欢的查税员，之后又放弃这差事去做秘书。这就是她在战争早期邂逅我父亲的缘由。

我是相当正常的小男孩，很慢才学会阅读，但对事物的来龙去脉却非常有兴趣，在校的成绩从未在中等以上（这是一所精英学校）。我12岁时，一位朋友跟另一位朋友用一袋糖果打赌，说我永远不可能成材。我不知道这个赌的输赢是否已被敲定。如果是，究竟是哪一方赢了？



伊莎贝尔和史蒂芬在1942年



法兰克·霍金和史蒂芬在1942年

珍娜·韩福瑞

我的第一个记忆是伊莎贝尔沿着北路推着一辆相当陈旧的摇篮车，里面躺着史蒂芬和玛丽。因为这两个小孩有很大的头和粉红色的脸颊，所以非常引人注目。他们的一切和常人看起来都不一样。



1946年史蒂芬和他的妹妹玛丽。“他们有很大的头和粉红色的脸颊，所以非常引人注目。”

伊莎贝尔·霍金

史蒂芬在某些方面肯定是非常能干的，但不是所有方面。他相当晚才学会阅读，他妹妹就快得多；但他总是很多话，也富有想象力，这方面比数学方面发展得更快。他喜欢音乐和演戏。有一件事他记得最清楚，我们带他去看过班杰明·布莱顿的《让我们演歌剧》的首演。我想因为史蒂芬相当懒惰，加上他又有许多自己爱做的事，所以从未在音乐方面有过任何发展。



珍娜·韩福瑞受过一般医学和精神病学的训练，现为一位开业的弗洛伊德分析专家。她的父亲约翰和史蒂芬·霍金的父亲在同一研究所工作。当西蒙·汉弗莱和史蒂芬·霍金在海格特同一所小学上学时，汉弗莱一家认识了霍金一家。1959年当霍金一家的其他人都到印度生活时，由于史蒂芬在上圣阿尔班斯学校，所以在汉弗莱家住了1年

基本上他们只不过是孩子，我们比较注意的是我丈夫的才干而不是史蒂芬的。尽管如此，史蒂芬一开始就是个自学者。如果他不想学什么东西则多半是他不需要。他大体上像是一张吸墨纸，把什么都吸收进去，我们经常把他和妹妹带到南肯辛顿的博物馆去。我把他留在科学博物馆，把玛丽留在自然历史博物馆。费利珀从小就非常爱艺术，我就把她带到维多利亚和阿尔伯特博物馆。因为她当时最小，我就和她待在一起，而让其他的孩子去逛。他们没有任何人想到另外的博物馆去，他们根本就不一样。

史蒂芬从未受到他父亲工作的影响，他对生物学从来就毫无兴趣，他不要宠物。他从小就爱制造东西并且非常多话。

玛丽·霍金

史蒂芬曾计算过，共有11种进屋子的方法。我只能找到其中10种，迄今仍然不知道这第11种是什么。屋子的北边是一间自行车库房，前后各有一扇门。在这上面是一扇通到L形状房间的窗户。你可以在前面绕过一个角落爬到屋顶上去，而从那一层你可以爬到主屋顶上去。我想这儿是史蒂芬进屋的方法之一，正如我说过的，他是比我强得多的攀登者。我们不清楚哪里还有其他的方法。它们不可能是门廊的上方。这个门廊在当时都已经相当腐朽了，上面有许多玻璃。门后面是温室，它其实在那时候就已经倒塌了，每次刮风的时候总有一些玻璃片落下来。

爱德华·霍金

这房子令人印象最深的是篱笆。我曾好几次说服父亲把它拉倒而让矮树长大，但是他坚持要修补这个篱笆。他不愿意花任何钱，而是东拼西凑地到处拣一些木条，就把它们钉上去。

我把朋友带到家里时总有点难为情。前门曾经一度显得非常优雅，上面的有些彩色玻璃已经破碎。他通常不去更换这些玻璃，而是用填充品或黏土拼拼凑凑、涂涂抹抹。墙纸虽然华丽，却也够令人难为情的。天才晓得它贴在那里有多久了。



1945年8月的抗日胜利日，3岁的史蒂芬和他的姑妈梅雷尔——法兰克·霍金的姐姐在一起



1946年史蒂芬和玛丽在海滩上玩耍

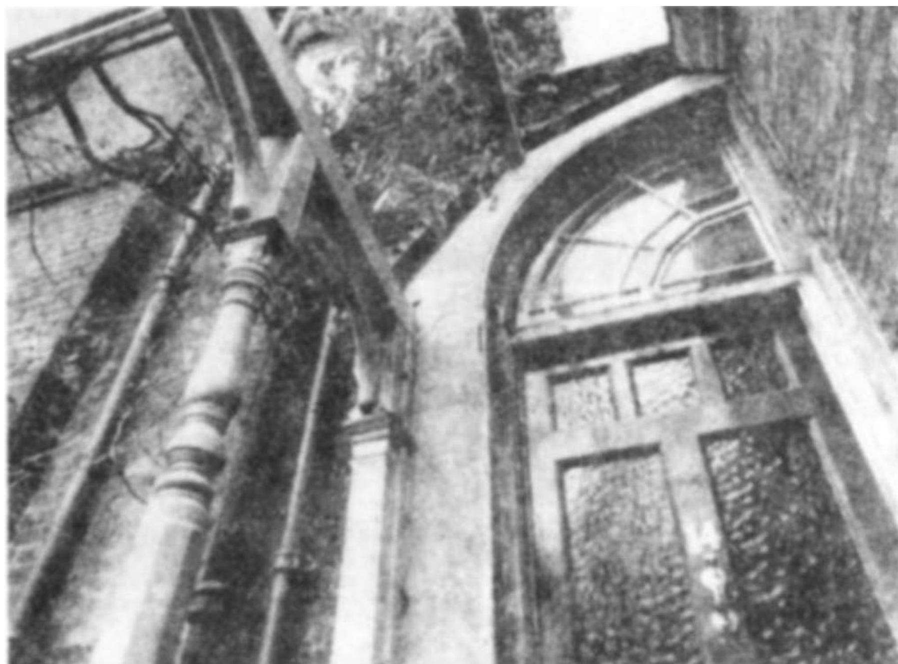


玛丽·霍金比她哥哥史蒂芬小18个月，在伦敦的圣·巴兹学习医学，现在是丹斯特布尔的全科开业医生



霍金在圣阿尔班斯的房子

这是一幢非常大的、阴暗的房子。它就像闹鬼似的那么恐怖。我在冬天早晨醒来时，房间里结满了厚霜。家里有一台不能正常工作的散热器，它被大厅里的一台储热器所取代。所有卧室都有火炉，在每间房里都生火当然是不实际的，所以我们只在楼下生火。



一度“非常优雅的”霍金家前门



爱德华·霍金比他的哥哥史蒂芬小14岁。他在伦敦北部大约30英里处的卢顿开一间小建筑行

这整幢房子也许有点像大怪物。但是不管怎么说，因为这是我们的家，所以我们喜欢它。

伊莎贝尔·霍金

在圣诞节期间，我们通常去看童话剧。有一回他们演《阿拉丁》，其中有阿拉丁的宫殿魔术般升天的一幕。

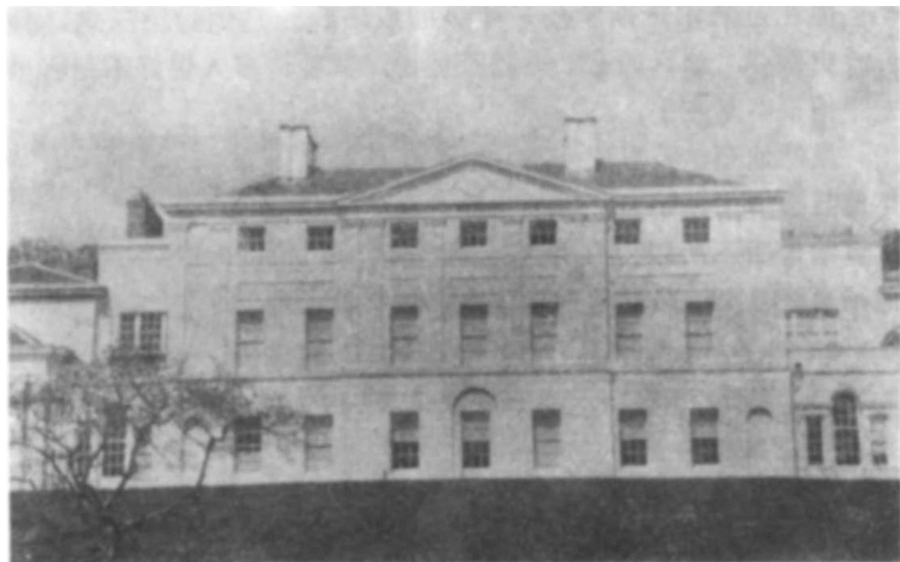
我们离开戏院后，史蒂芬要去找这座宫殿，所以花了很长时间才到家。他那时已经知道，升上去的东西一定会落下来，而在汉姆斯达德的某处可以找到这座宫殿。我们花了很长时间才说服他，事情并非如此。

他一直告诉我，在一处叫做德伦的地方有一幢想象中的房子。他老想坐公共汽车去那里。我们只能阻止他。

有一回我们去汉姆斯达德·希斯的肯伍德宫，史蒂芬忽然意识到，这便是他在德伦的房子。他用平静的语调告诉我这真的就是那房子，他显然对此梦寐已久！

珍娜·韩福瑞

史蒂芬非常可爱、活泼和富有情感，不过他的语言不能和他的思维同步。有时他讲话会结巴。他和我儿子西蒙同岁，但他长得比较小。我记得有一回他沿着北街放学回家，其他一些小孩开始揶揄他，而史蒂芬全然不顾自己的个子小，回过头来挥拳威胁他们。这就是他的作风，他不输给任何人。



史蒂芬想象中的“德伦”的房子：汉姆斯达德·希斯的肯伍德宫

伊莎贝尔·霍金

我想他在圣阿尔班斯学校一年级的成绩是倒数第3名。我说：“史蒂芬，你真的这么差吗？”他说：“其他许多人也好不到哪里去！”他根本不在乎。

虽然他在学校里成绩不好，但是总被认为非常聪明。有一年他甚至得了神学奖，因为在他非常年幼时他父亲就一直讲圣经故事给他听，所以得奖并不使人意外。他对这些故事非常熟悉。他通晓教义，虽然他现

在很少参加宗教活动。

玛丽·霍金

父亲的专业是热带病学。他经常做野外工作，通常是在年初，因为这是非洲的最佳季节。所以我总有印象，父亲像候鸟，总是过完圣诞节就消失了踪迹，一直到季节回暖时才回来。别人的父亲在这段时间还住在家，反而使我相信别人的父亲有点古怪。他归来时总带回一些奇妙的东西，木刻的动物、豪猪毛以及木瓜等。

伊莎贝尔·霍金

我丈夫兴趣非常广泛，而医学只是其中之一。其实医学不是他所真正感兴趣的，他开业当医生一定不行。他所感兴趣的是研究，几乎可以研究任何东西，只是碰巧选了医学，而他生命中的特殊境遇使他去进行热带病研究。他也很幸运，因为他在1937年得到一份奖学金，使他能在非洲做两年睡病虫的研究。

由于他每年冬天要去非洲大约3个月，所以我们家大部分时间都是单亲家庭。他和史蒂芬并不经常见面，但是他的确把史蒂芬的兴趣引向了天文学。我记得我们大家都躺在草地上用望远镜观看星空奇观。史蒂芬总是能感受到奇妙的事物，我看得出来，星星很吸引他，而且他的想象力驰骋到星空之外。

约翰·马克连纳汉

我和史蒂芬从大约10岁或11岁时就认识。我对这个家庭和房子最早的记忆是，维格纳的音乐在巨大的客厅里回响。他们对维格纳极其着迷。回忆起他的家庭多半是他们如何与众不同，现在回想起来，也许比我当初想的更不寻常。

回想起来几乎同样令人惊讶的是，史蒂芬显然变得非常聪明。这在他上小学时并没有很多征兆。他的动作不协调，我想他一直是这样的。他在学校的成绩不好。



约翰·马克连纳汉10岁时在圣阿尔班斯学校认识史蒂芬，上了不同大学后两人失去联系，后来在剑桥又成为朋友。他获得工程博士学位，现任伦敦国王基金学院的行政职务

玛丽·霍金

我们把蜜蜂养在地下室里，有一天淘汰多余母蜂的正常自然过程不知出了什么问题，结果一直在产生母蜂，最多的时候我们有了6群或7群蜜蜂。母亲必须不停地收集这些蜂群，不知道该把它们安置到什么地方。最后她把其中一些放到地窖外的一个入口，当蜂巢都用尽时，那似乎是个好地方。但是刚好那天夜里我们的房客把自己锁在门外，并想从这入口进来。侥幸的是那时天很暗，这些蜜蜂都很困了。

贝西尔·金

那时我知道的同学中唯有史蒂芬需要一本字帖，因为他的字实在太糟了。他收到的一本字帖是用铜版字体写的一些句子，在每个句子下都有5～6行空白以便临摹。我不知道他持续了多久，或者他应该持续多久。但这是他字写得无比糟糕的证据。

我还记得有几次拜访霍金家的情景。他家的习惯是这样：如果邀请你留下吃饭，就会让你和史蒂芬交谈，而这个家庭的其余成员会坐在桌子边上看书。在我的社交圈里这是不被认可的行为，但这在霍金家是被容忍的，因为他们是公认的与众不同、极有智慧、非常聪明的人，就是有点怪。

我还非常清楚地记得，史蒂芬的父亲法兰克为了保暖坐到一个封闭的燃烧炉子前面，还在平常穿的衣服之外再罩上睡袍。法兰克·霍金有非常严重的口吃。我们大家都相信，霍金一家是这么聪明，以至于他们的言语跟不上他们的思想，这就是他们为何口吃，为何结巴，为何他们以这种相当笨拙的方式说话。我想你在这个家庭的其他成员身上也能看到这一点。那时在史蒂芬身上也能看到这一点。



贝西尔·金是史蒂芬·霍金在圣阿尔班斯的同学和好朋友，他现在是专治儿科热带病的医生，在肯尼亚的一个国际慈善机构工作

约翰·马克连纳汉

房子里摆满了书和书架。大部分书架都里外放两层，书架中书顶上又平摆着书。

史蒂芬的父亲，至少对我来说，是相当遥远的人物。我想他是非常害羞的。不管是他自己的还是别人的孩子，他都不知道如何打交道。我想，他那时候似乎生活在不太一样的层面上，把大部分精力花在工作上，照料一幢大而乱七八糟的房子，用不多的收入来支撑一个中等大小的家庭。

史蒂芬的母亲较热情，虽然或许也有些害羞。我的印象是她把大部

分精力花在管这幢房子、管孩子，这是因为史蒂芬的父亲经常到海外旅行。

我在那里总是受到欢迎，我数不清我们在彼此家里吃了多少顿正餐。这些都是即兴的事，我们不需要邀请。我们也许一起放学回家然后热衷于交谈，以至于决定不愿回家。

史蒂芬的母亲比我母亲烧菜更会花样翻新，这对我来说也是有趣的。我清楚记得第一次吃到烩饭的情景，现在这并没什么稀罕，但是那时候我从未吃过。

伊莎贝尔·霍金

我们早先有一辆马戏车，放在奥斯明顿磨坊的牧场。虽然我们买的时候嫌它到处都是臭虫，但它很漂亮。它有双层表皮，所有臭虫都躲在夹层。可是我们把它喷药消毒过，从此就再也没有臭虫了。

我们把它放在牧场，还用一顶巨大的军用帐篷罩住，有好几年我们几乎所有假日都在那里度过。孩子们在那里非常快乐。我们只要走100码（1码≈0.9米）就可以到有很多石头的海滩去。

我们对野外活动上瘾到如此程度，以至于在1953年女皇加冕那天还把孩子带到马戏车那边去。从此他们显然不能谅解此事。因为当其他人都到街上聚会狂欢时，他们这一次举国欢腾的经验却被剥夺了。我们向来不擅长聚会狂欢之类的事。当我丈夫说“快点，现在要去海滩”时，玛丽说她正在收听收音机中加冕的消息。

孩子们就只好违背了他们自己的意愿，被迫到野外去。

我们通常是开一辆计程车去那里，我们买了一辆伦敦计程车来代步；这是在市面上买得到车子之前的事。我们买的是二手车，并把一张桌子放在当中，两个孩子坐这边，另两个孩子坐那边，他们可以玩牌。他们在路途中做什么都可以。

约翰·马克连纳汉

那时候，我们用霍金家的车子做过多次远足。这是一辆伦敦的计程

车，非常破旧的战后计程车。我们有一回穿过开阔的原野到少女城堡航海，史蒂芬的母亲在前面驾车，而包括我在内的三四个小孩在后头越过这辆敞篷计程车顶向外眺望。前面没有罩，而后面的罩被折叠起来，所以我们完全暴露在外。车子以非常接近极限的每小时大约40英里的速度向前飞奔。

我觉得，这个家庭就是会做那些古怪的事。我们没有小轿车。那时候大多数英国人都没有，除了非常富裕的人以外。而拥有一辆破破烂烂的旧伦敦计程车更显得与众不同。



1952年8月史蒂芬、玛丽和费利珀在马车前

玛丽·霍金

史蒂芬沉湎于书本，这给我留下了非常清晰的印象。我不知道他在

看什么书，在身边还放了一筒饼干。你不会引起他的注意。他完全被书吸引住了，而饼干也就不知不觉地吃光了……我想，当他从书中抬起头来时一定会非常惊讶地发现，饼干已被吃光了！

伊莎贝尔·霍金

他甚至从很小的时候起，如果对某种东西有兴趣，就会百分之百地专注。我记得有一次，他坐上他农村亲戚的拖拉机或是某种农耕机研究零件构造时，其他孩子真的爬到他的头上，而他根本就毫无感觉。

迈可·丘吉尔

我上三年级时才第一次见到他。他是班上最优秀的学生之一，是6～8个聪明学生中的一个，但他不是最顶尖的，他只是顶尖的学生之一。他衣服散乱，衣领上有墨水印——很容易相处，不过身体弱小。他在洗澡时常被取笑，组队时常是最后一个被选上。但他毫不在乎，而且自我欣赏。

他讲话非常快，几乎是不连贯的。而且他有一种特别的语言，一种压缩词汇的讲话方式，有时颇有创意。我记得有一回他把“侧影轮廓”有趣地压缩成“撕影”。



1957年，迈可·丘吉尔在圣阿尔班斯学校遇到史蒂芬·霍金。当丘吉尔在牛津学艺术时两人失去联系，后来又恢复了友谊。现在丘吉尔放弃伦敦的《独立报》的通讯员工作，成为一名自由记者

伊莎贝尔·霍金

他13岁时得了一种病，这可能和后来的病有关。我们恐怕永远也不会知道了。那时诊断是腺热，病征是一阵阵的轻微发烧并且持续了很长时间。然后他似乎痊愈了，但是否完全复原我就不知道了。

玛丽·霍金

父亲擅长神学辩论，所以大家都习惯于争辩神学。真是一个又好又安全的课题。你不需要提出事实或者其他令人分心的东西。如果你沉迷辩论，你可以十分尽兴地争辩任何事情——包括神学以及上帝存在与

否。然后若有人感到厌烦或者《太空之旅》节目播出，或诸如此类，则辩论就中止了。

约翰·马克连纳汉

史蒂芬的父亲有间温室。我们经常在那里玩烟火。不清楚配方是从何得来的，事后回想起来，其中有些非常危险。

我们曾经有过一位深受爱戴的，但又非常严肃的英文老师，他教我们莎士比亚的戏剧。4月1日，我们中的一组人决定要使他不要像平时那么严肃。我们做好碘化钾，在过滤纸上使其干燥过后就成为雷管炸药。我们在他座椅的每一只椅脚下都放了一块，只要他进来一坐上就会爆炸。果然，他大吃一惊。我们还在他一转身就能看到的黑板位置写上从《第十二夜》摘录的诗句：“难道你自以为，就因为你的德行，尘世间就不再有饮宴欢乐吗？”

他轻松愉快地接受了这一场玩笑，上帝保佑他！

伊莎贝尔·霍金

烟火既稀罕又昂贵，所以他们从前自己制造。当然是在我丈夫的完全控制之下，因此是很安全的，不过我还是不喜欢。

他们在小屋里制作，在11月5日盖·福克斯日去放烟火。孩子们以这种方式学了不少化学知识，诸如你放不同的颜色就产生不同效应。而且烟火相当有效力，史蒂芬和他父亲都十分喜欢。

史蒂芬和他父亲还一起勘察测量。我想每一个人都应试试，因为这很切合实际又可以学理论，而且可以欣赏美景。他们常到齐尔顿领地的爱文豪灯塔去勘察。他们沿着其中的一条路走，并且到各处勘察测量，还一起作记录。

迈可·丘吉尔

我并没有把他当一回事，他只是一个聪明的小鬼头。当然是一位好朋友，但不是什么先知或是对生命意义有伟大了解的人。有一天下午我

们在他的房间里打发时间，那里的乱七八糟已成了笑柄，就像是疯狂科学家的房间。我们开始谈论生活和哲学等。我自以为非常高明，所以就高谈阔论。

我忽然明白了，他是在鼓动我，使我愚弄自己。那是使人丧失信心的时刻。我觉得自己被狠狠地轻视了一番。我觉得他在远处看着我并感到好笑。

我到这一刻才首次意识到，他是与众不同的，不仅是智慧、聪明、杰出、富有创见，而且是非比寻常。他无比自傲，如果这么讲也可以，一种知悉整个世界的自傲。

贝西尔·金

我们讨论生命自发产生的可能性。我想史蒂芬提出了一种看法不仅表明他思考过这问题，而且甚至计算出它的过程要多久。那时候我曾对我的朋友约翰·马克连纳汉说：“我认为史蒂芬会成为非同寻常的能人。”

约翰不同意，所以我们孩子气地用一包糖来打赌。而且，顺便提及，我断定我赌的已被证明是正确的，我应该得到报偿，但至今尚未得到。

约翰·马克连纳汉

我们3个人打了一个赌，其内容是我们之中没人会成大器，或者是其中有人会成材。我已记不清打赌的细节了。但是史蒂芬仍然坚持说，因为他出名了，而我还未送给他一包糖，所以我还欠他的。

甚至在事后回想起来也很难看出征兆。他从前就非同寻常，但是那时他的杰出才华在理论方面并不明显。但是我还记得一个故事，不知为什么我们讨论这样一个问题：如果你有一杯烫嘴的茶，先加牛奶还是后加牛奶使它凉得更快？我根本不知道如何对付这个问题。但是对于史蒂芬而言，这真是不费吹灰之力。他是这么论断的：任何热体都以和它的绝对温度4次方成比例的速率散发热量。所以史蒂芬说越迟用牛奶去稀释则冷却越快，所以你应该最后而不是最初加入牛奶。

玛丽·霍金

因为史蒂芬从12岁以后就极其认真地玩游戏，所以我就放弃和他玩了。我们玩大富翁游戏，为了使游戏更复杂，首先在板上建了许多横贯铁路。大富翁游戏还不够变化多端，他最后玩一种叫做“朝代”的可怕游戏。我说过已经放弃跟他玩游戏，所以我没玩过这游戏。就我所知，这种游戏会永远进行下去，因为没法结束它。

伊莎贝尔·霍金

就我旁观，这游戏几乎取代了他的日常生活。它要花好多个钟头。我认为是极可怕的游戏。很难想象有人能如此入迷。但是史蒂芬的思想总是很复杂，我觉得这游戏能吸引住他的原因就是它的复杂性。

约翰·马克连纳汉

史蒂芬对发明复杂游戏非常在行。相形之下，大富翁只是小孩子的玩意儿。这些游戏在一块大硬纸板上玩，纸板约3英尺×2英尺（1英尺≈0.3米），并分隔成许多半英寸（1英寸≈2.54厘米）见方的方格。它们多半是规则复杂的战争游戏，按照投骰结果来规定你能走多远。普通一次游戏至少要花4～5个小时，有些甚至要花1个星期分成好几次来玩。

迈可·丘吉尔

他喜欢设计规则。他最大的成就是设计一种费时的游戏，大家围着桌子投骰，要花整个晚上才能得到结果。这是一种迷宫。他喜爱这样的事实，他创造了一个世界然后又创造了统治这一世界的定律。他也爱使我们服从这些定律，并对此洋洋得意。

伊莎贝尔·霍金

我想他们是在上五年级的时候制造电脑。肯定是五年级，因为他们上了六年级以后就都太忙了。我记得他们一共有6个人，这是1957～

1958年的事，电脑发展的初期。他们用了大量零件，譬如钟的内部零件等。而且这电脑真能回答问题。我们所有人都去学校参观。它造成了一阵轰动。只要你问正确的问题，多半都能得到正确的答案。

这不只是史蒂芬的功劳，他的手向来不灵巧。他会是在背后出主意的人，也许不止他一人在出主意。我想手很巧的约翰·马克连纳汉做了很多实际工作。不管怎么样，他们共同分工合作。



史蒂芬和他的自行车（1957年）

约翰·马克连纳汉

我记得，当我们制造这类电脑玩意时，他能做较复杂的操作，但是有时我安排的事，他尝试了一下就回来说："我做不了这个。"我的印象中他特别瘦长。可是我的一位大学朋友那时也是一样瘦，但他现在好好的。所以我想，史蒂芬的情形是神经和身体的习惯动作。

伊莎贝尔·霍金

他就读圣阿尔班斯学校最后一年时，我的丈夫找到一份科伦坡计划提供的差事，我们必须去印度。科学家和各种人才经由这个计划被送到印度及其他地区的研究所，和当地的人一道工作并交换知识等。所以当

法兰克得到任命后，除了史蒂芬，我们一家都跟着去。他在那一年得到A等成绩，我们认为他不应该离开。

珍娜·韩福瑞

霍金一家去印度时，决定把史蒂芬留下和我们生活一年。我们有一栋大房子和一个大家庭，况且那时他不应该离开，不能说休学就休学，一年休学事关重大。他和我们一块住当然可以放心。

史蒂芬的动作相当笨拙。我记得他在擦净桌子后，推着一整车的餐具进厨房，撞上了什么东西使得整车东西都掉出来。大家全笑起来，但是在停顿了一下之后，史蒂芬笑得最大声。

但是他同时却是井井有条的，例如有一回他提议晚上跳苏格兰舞。我现在提醒你，这是一栋极寻常的房子，我们有许多空间和一间大厅。我们买了一些唱片和一本书学习怎么跳舞，史蒂芬负责此事。他坚持大家要穿西装和打领带，因为他是孩子中最大的。他是全过程的总管。

我已记不得我们多久跳一次舞，但是大家的确非常快乐。史蒂芬对此非常认真。你知道，那时他爱好跳舞。

伊莎贝尔·霍金

那期间大家和史蒂芬密切通信，我仍保存那些信件。虽然史蒂芬随手丢弃信件，但是韩福瑞一家叫他保存信件。可惜我找不到史蒂芬写的信，我想由于他不太爱写信，所以他的信相当枯燥无趣。我想，他之所以回信是因为韩福瑞博士命令他坐下，并对他说：“你现在要给家里写信。”

但是那一年他和韩福瑞一家过得很好，我们在印度也过得好极了。直到最后史蒂芬才和我们团聚，那时他已经通过了牛津考试而且得到了奖学金。

第2章

史蒂芬·霍金

我父亲希望我去研究医学，然而我觉得生物学太偏重描述而不是基础学科。我要学数学和物理，但是我父亲认为数学除了教书别无出路。所以他叫我学化学、物理，只学一点数学。

另一个反对数学的原因，是他希望我上他的母校——牛津大学的大学学院，而那个时候该学院不教数学。1959年我如期到那里学物理。由于物理制约了整个宇宙的行为，所以我对物理最感兴趣。对我而言，数学只不过是研究物理的工具而已。

我那年级其他大部分学生都在军队中服过役，所以他们的年龄大了许多。我在牛津的第一年和第二年有时候会觉得相当孤单，直到第三年才真正地感到快乐。那时在牛津流行的态度是非常厌恶用功。你要么毫不费力地得到优秀成绩，要么就接受自己能力太差干脆拿四等成绩。经由用功而得到好成绩则被当作“灰人”的行为，这是牛津词汇中最坏的诨名。

那时牛津物理课程的安排，使得学生很容易逃避用功。我上大学前考了一次，然后在牛津过了3年只在最后考一次毕业考。我有一次计算过，在牛津的3年中，我大约总共学习了1000小时，也就是平均每天1小时。我并不以那时的不用功为傲，我只不过是描述当时的想法而已，这就是我和大部分同学共同的态度：一种百般无聊的心态，而且觉得没有任何事情值得争取。

德瑞克·鲍尼

我在大学学院的那一年共有4名学物理的：史蒂芬、高登·贝瑞、里查德·布雷安和我自己。我记得对史蒂芬的第一印象是，当高登和我在晚饭后到他屋子里找他时，他正坐在一箱啤酒前，要把那箱慢慢喝光。那时他才17岁，当然不能合法上酒吧。他很年轻即进入了牛津，他比惯例早一年就参加了奖学金的考试，当时只是想见习一下。但是令学校惊异

的是他通过了考试，因此他们决定接受他，同年10月他就上了牛津。

我认为那时我们没有人知道史蒂芬到底多聪明，直到第二年我们才发觉到这一点。我们在个人指导时被分成两对，这两对的进度完全相同。有一次4个人做同样的作业，我们被指定读《电磁学》第十章。这是由很特别的作者组合布里尼夫妇合写的。该章结尾附有13个问题。我们的导师玻比·伯曼说："尽可能完成。"

我们尝试一下以后，我很快就发现一题也做不出来。里查德是我的工作伙伴，那个星期我们一起设法解出了其中的半个题，为此我们感到很得意。高登拒绝任何协助，自己设法解出一题。史蒂芬和往常一样还没有开始。他上学时不甚用功。



德瑞克·鲍尼是史蒂芬·霍金在大学学院时的四个物理同学之一，他离开牛津之后在伯里斯特尔大学作研究，现为离伦敦很近的埃萨克斯的圣十字学校校长

我们对他说："这习惯不好，史蒂芬，你早晨应该起床吃早饭。"他

从来不吃早饭，这对他来说似乎是件大事。他沉思地盯着我们，第二天早晨他真的起床吃早饭。那天上午我们这些乖小孩跑去上9点到12点的三堂课，史蒂芬没去。我们走时大概9点或者9点差5分，因为从大学学院到实验室去上课只要5分钟的路，史蒂芬也在那时回到自己的房间去。

我们12点左右回来时，史蒂芬刚好下来。我们在学院的门口相遇。






左上　史蒂芬·霍金右上　高登·贝瑞　左下　里查德·布雷安　右下　德瑞克·鲍尼

“啊，霍金！”我问道：“你做了几题？”

“哦，”他说：“我只来得及做这前面的10题。”

我们所有人都大笑起来，而他却满脸狐疑地凝视我们，这使我们全都呆住了。我们立刻意识到，他的的确确做了这前面的10题。我想，这时大家才意识到，我们和他不可能同行并进，我们就像来自于不同的星球。

派却克·沈德斯

史蒂芬对规定的作业兴趣不大。我们有一回必须教学到统计物理学，这是期终考的理论部分。我让他看一下那学期要读完的书。他瞥了一眼，似乎一开始就不喜欢。尽管如此，我坚持我们必须在第一周学完第一章，而他必须完成我指定的两个问题。



派却克·沈德斯是大学学院的研究员，也是史蒂芬·霍金的导师。他现在是牛津克拉伦顿实验室的实验物理教授

同一周在第二次辅导时，他并没有带来问题的答案，而是把他标出所有错误的那本书带来。他把书放下后，我们对此课程进行了短暂的讨论。我在那时就很清楚，他对这课程比我了解得还多。

罗伯·白曼

我第一次见到史蒂芬时，他大约还不到17岁。他的父亲是学院的老成员，他把史蒂芬带来见我，我们泛泛地谈论进学院和读物理等。事实上就我所记忆的，多半是他父亲讲话，史蒂芬并没有给我留下深刻的印象。



罗伯·白曼曾在剑桥学习，后来在牛津的物理系得到一个教职，在牛津时为史蒂芬·霍金在大学学院的学监和物理学导师

但是他的入学考试很出色，尤其是物理学。那时的一般面试是有院长和高级导师以及各种其他的学院权威参加。大家立即一致同意，他作

为一位未来的大学生绝对适合，所以无异议地给他奖学金并让他读物理。

他显然是我所教过的学生中最聪明的。我从那时开始教过大约30名学生，他的最后考试并不比其他学生好，当然考得好的学生不仅是聪明而且非常用功。史蒂芬不仅仅是聪明，他甚至不能用聪明来衡量。按照正常标准不能说他非常用功，因为这实在没有必要。他每一周都完成辅导的作业。我想我真正的作用只是监督他学习物理的进度。我不能自夸曾经教过他任何东西。

高登·贝瑞

史蒂芬也许是我在大学学院时期最了解的人。我们在一起接受指导，一周里有6个下午到河边去，晚上还一块玩桥牌。



高登·贝瑞是史蒂芬·霍金在大学学院物理辅导的伙伴和好朋友。他和霍金一样，也是一名舵手。

贝瑞毕业后转到美国攻读高级学位。直到最近他一直被芝加哥大学的核子物理系和阿贡国家实验室共同雇用，现在他只为阿贡国家实验室工作，在那里管理一个4人的研究小组

我们有一位极好的物理导师玻比·伯曼，他的领域是热力学。我想，玻比对于我们没有学到什么一定感到很失望，因为我们根本没有努力用功，而史蒂芬是分明不在乎。作为大学生，我们绝对谈不上学到很多物理知识，重要的事情是游玩和社交。我是说，这是我上牛津的原因。我想，我们的导师对于我们从未做过任何建设性的事，必定感到很沮丧。尽管如此，我所学到的热力学影响了我日后的研究，也对史蒂芬的黑洞研究有着非常重大的意义。

诺曼·狄克斯

我们过去有称作召集网的方法，就是以这种方法网罗到他。我们组织啤酒聚会或者诸如此类的事，尽可能去吸引新生来参加赛船俱乐部。



赛船是大学学院的主要活动。当史蒂芬·霍金在那里念本科时，诺曼·狄克斯是学院船长。他在牛

津工作了40多年，现已退休

但是对于史蒂芬的问题，是让他担任前面八周还是后头八周的舵手。你知道，有些舵手非常爱冒险，另外一些则非常稳重，而史蒂芬是属于冒险型的；你永远不知道当他和这些水手出去时究竟会闯出什么祸来。我想有时他会把功课带到船上来；他的思维会在不同的水平上进行。

但是他有一副相当嘹亮的好嗓门，虽然不是军官的嗓门，但也够威风凛凛的。

赛船俱乐部在那个时期的活动十分活跃。他们很喜欢河流，这就够了。他们默默埋头去干，不像现在的人那样——现在划船最糟糕的事是没人输得起。他们所有人集中在一起，并且需要心理专家去分析失败原因。我觉得输掉就是因为有人比你强一些。



1961年史蒂芬·霍金在牛津为他的船掌舵

高登·贝瑞

关于我们怎么加入赛船俱乐部，我的记忆有些模糊。但是我想大概是他们在地窖里聚会，而我们下去喝饮料。他们说服学院里的大个子到

河上试划——不管这些人以前划过船没有，然后他们再去找一些小个子。我个子不是很小，但是非常瘦。而我认为史蒂芬的个子刚好小到可以当舵手，又不够大到可以划船。我们俩人都很想去试着掌舵，就这样去了。



大学学院的赛船俱乐部成员，右边是热情奔放的史蒂芬·霍金（1962年）

整整3年期间，我们对河流留恋不已，且视之如命。按规定，我们每周必须有3天从上午9点到下午3点待在物理实验室里做实验。但是，史蒂芬和我理所当然一周6个下午都在河上。如果总得放弃一些东西的话，那肯定是物理实验。史蒂芬和我成为收集数据极快的能手，收集最小量的数据并进行最大量的数据分析，我们显得真像做了实验似的。这就需要花些心思，我们必须使那些监督实验成果的人相信，我们按部就班地做过了，尽管他们明知道我们没待在实验室里。我们必须非常小心地完成实验报告。我们从未欺骗，但是做了大量的解释。



大学学院物理学会成员聚会

德瑞克·鲍尼

史蒂芬和我们其他人相比是如此之聪明，以至于我们和他相处很困难。我认为，史蒂芬和那些按照他的标准而言并不聪明的人的相处之道，是寻找自卫术，巧妙地用它来应付这些人。但是按照他的标准，甚至在牛津，我们这些人都是相当愚蠢的。而和比你愚蠢许多的人朝夕相处是十分困难的事。因此我想，你必须使自己成为非常内向的人，甚至为了自卫几乎把自己化为漫画人物。

伊莎贝尔·霍金

他没有任何异常之处，在我们看来似乎一切都很好。他走路很正

常，并不用拐杖。我们从印度回来不久，在他上牛津之前，我开车带他和他弟弟一道去渥本公园。他在公园攀登树木。我想，他是在检验自己。但是我没有意识到为什么。他爬上一棵树并沿着一根树枝走，然后再下来。

高登·贝瑞

大学学院有一种方形的楼梯，它们既方又圆。有一次史蒂芬在下楼时跌倒在楼梯上，并一直弹到最底层，他撞伤得很厉害。不知他是否失去知觉——也许暂时失去了知觉——可是他的确失去记忆；他甚至不能记得自己是谁。

于是，我们把他抬到我的房间里来，让他坐在沙发上，而他的第一句问话当然是：“我是谁？”

我们告诉他：“你是史蒂芬·霍金。”

他紧接着又问：“我是谁？”

“史蒂芬·霍金。”我们说。

两分钟之后，他记起了他是史蒂芬·霍金。但他对问过“我是谁”这件事已经记不清，而却记得他家一年前的生活。然后他问：“这是什么地方？”我们告诉他“你在大学学院。你刚从楼梯上跌下来”，等等。他一面听，一面问不同的问题。他开始讲：“哦，我记起来了，我是1959年上大学学院的。”而且他记得所上的课程，但是他不记得一年前发生的事，后来是不记得一个月前发生的事。就这样，我们试着告诉他大学学院在这个时期发生的事，而他说：“哦，是的，我记得那些。”然后他记起了一个月前发生的事，再是一周前发生的事。

他的记忆逐渐在恢复，他本人以及我们所有人都明显看出来了，而我们只要耐心一些就是了。我们问他一些问题，看看他是否记得一周前所发生的事。

我们问：“嘿，你记得星期天晚上去过酒吧喝酒吗？”或者：“你记得星期一在河上划过船吗？”我们一直问到他记住为止，然后再往后一天。越往后花费的时间越长。我想大约花了两个钟头他才记起了从楼梯上跌

下的事。

问题在于，他也许因为这桩事件而失去一些脑力。史蒂芬决定：“我要把这一点弄清，看有没有发生严重的损害。我要进行智力测验。”因此，他参加了智力测验并理所当然地通过了。他大约得了200或250分，所以一切都没问题。

德瑞克·鲍尼

到了毕业考时的确有些吓人，为获取荣誉学位，我们要在4天之内从早晨到下午不停地把三年来所有功课考完。我们四人决定每天晚上去不同的饭馆吃饭，我们只吃饭而不谈功课。

我记得，我们之中三人在最后一个晚上非常沮丧。史蒂芬认为他不会得到一等。里查德认为他甚至连三等都捞不着。我估计自己得不到二等。高登则显得兴高采烈，他想他得到了一等。

这样，我们之中三个人很沮丧，一个人极其快乐。而实际上，我们所有人都错了。史蒂芬得到一等；我得到了二等；里查德得到了三等；而高登没得到一等，他得到了二等。所以四个人全都错了。

第二天大清早我收拾好箱子，非常匆忙地坐上9点10分的火车离开牛津。因为在牛津的日子是我的黄金岁月，所以我不想见到曲终人散的结局。

史蒂芬·霍金

因为我很疏懒，所以预备只回答考试中理论性的物理问题，而避免需要死记硬背的问题来通过大考。我考得不是很好，处于一等和二等的边缘。



1962年史蒂芬·霍金在他的毕业典礼仪式上

我还得参加口试才能决定最后成绩。他们询问我未来的计划。我回答说要做研究，如果他们给我一等则上剑桥，如果给二等则留在牛津。他们给了我一等。

伊莎贝尔·霍金

我记得他在牛津的第三年，自己就开始注意到手不像过去那么灵活了，情况变得有点困难。但他没有告诉我们。我对他很忧虑，我们把它归因于考试压力以及年轻人的一般困难，所以并没有意识到它的严重性。

我想那是发生在夏季学期的事，他在期终考后正要回家之前，头朝下从楼梯跌了下来。他总是头冲下摔跤。我告诉他必须去看医生并做反射试验，看看摔坏了什么没有。这样他看了一次病。

后来他要和一位朋友去波斯（伊朗）。那时候必须21岁才算成年，我们其实有点担心。他虽然还不到21岁，实际上已经长大了，而同行的朋友经验丰富，以前还去过波斯。这位朋友的父母写信给我们说，他儿子了解一切并请我们完全放心。

我们就这么同意了，于是他们出发去了当时还叫做波斯的地方，他们玩得非常愉快，史蒂芬还写了两封信回来。他在最后一封信中告诉我们，他正要离开德黑兰去塔伯里兹。我不知道这封信在路上耽搁了多久，但是他告诉我预定到家的日期，他准备从伊斯坦堡搭学生火车回来。

此后便音讯全无。接着在德黑兰和塔伯里兹之间发生了非常严重的地震，我们有3周时间没有得到他的任何消息。那是一段恐怖的日子，我们和外国机关接触，他们只告诉我们这次地震没有涉及任何英国人。但是，我们知道地震正好发生在史蒂芬要上车的地方。

3周以后，他回到了黎巴嫩前线。他搭的公车颠簸得很厉害，所以史蒂芬通过这段地震地带时竟然没注意到地震。但当他到达塔伯里兹时，病得十分厉害，以至于必须下车。他的朋友和他待在一起，并且在塔伯里兹看了一次病。可是他们仍然没听到地震的消息，由于他们是陌生人，大家认为他们不会对此感兴趣，所以他们一直不知道。

他终于回到家时显得病恹恹的。然而这次病并不是他后来的病因。他在很久前已经病了。他只是不知道，至少我们都不知道。但是这次病是一大挫折，他的病情无疑因此而恶化了不少。

玛丽·霍金

我们有一次谈论到为什么不能沿着直线走，也许是前夜喝了太多啤酒的缘故。史蒂芬说他曾经试过而他从来走不了直线。他不认为那会是什么问题。

1962年秋天，史蒂芬·霍金上了剑桥，但是他的健康在往后几个月中更加恶化了。

史蒂芬·霍金

我过完21岁生日之后不久就进医院检查。他们从我的手臂取出肌肉样品，把电极插到我的身上，把一些放射性不透明流体注入我的脊柱中，一面使床倾斜，一面用X线来观察这流体上上下下流动。我被诊断为ALS病，即肌肉萎缩性侧面硬化病，或者英国人称作运动神经细胞病。

我意识到我得了一种可能在几年内致死的不治之症，这确是一大打击。我怎么会那么倒霉呢？怎么这种病会发生在我身上呢？

> 肌肉萎缩性侧面硬化病在美国被叫做庐伽雷病，这是以患该病而死于1941年的纽约扬基队的一垒手命名的。该病引起神经细胞逐渐瓦解，这些神经细胞位于脊柱和头脑内以控制随意肌肉的活动。患者头脑思维不受影响，通常因呼吸肌肉失效，导致肺炎或窒息而死。

伊莎贝尔·霍金

那一年非常寒冷，委鲁拉明水池也全结冰了。我们都去滑冰。史蒂芬滑得不错，不过那时候他和我滑得很靠近。他的技术不是很高超，我也不是。

后来他摔倒下去，并且爬不起来。他很明显有某种严重的毛病。我把他扶到咖啡厅取暖，他告诉了我一切。

我坚持要去见他的医生。因为我觉得不管还能活多久，总有人能做些什么，至少应该使人感到好过一些。

我现在不想提到这位医生的名字，我是在伦敦的诊所见到他的。他

对我居然会不辞辛苦去拜访他而感到惊讶。我毕竟是史蒂芬的母亲！虽然他相当和善，并且非常客气地招待我。他说：“是的，这是非常令人伤心的。这么一位优秀的青年，在他的生命巅峰横遭不幸，真是令人惋惜。”

我当然问他：“我们有办法吗？我们可以对他施行生理治疗或者任何有助的方法吗？”

这位医生说：“我毫无办法。情形大致就是如此。”

当然，当我丈夫得知此事，他必定要去找和他不同专长的医生来诊断。他们确认二者必居其一，也许是可以切除的脑肿瘤，也许是肌肉萎缩性侧面硬化病。

他们诊断的结果是：“他也许活不到两年半的时间。”

德瑞克·鲍尼

史蒂芬总是非常笨拙，但是我认为大家不以为这是什么大不了的问题。他在牛津第三年快结束时，有一回在宿舍从楼梯上跌下来。然而，没有人认为这有何不寻常。

我后来有一次到牛津，想找人共进午餐，但是都没有人在，然后正巧，史蒂芬刚好进门来。他慷慨地去买饮料回来，并放到桌子上，在放下他的啤酒时把它泼出来了。

“天哪，”我说，“怎么这时候喝啤酒！”

然后他告诉我，他在医院里住了两个礼拜，做了一系列检查并被诊断出了什么毛病。他非常直截了当地告诉我，他的身体将逐渐运转不灵。他们还告诉他说，最后他的身体会像植物一样，只有思维仍然是完好的，但是他将不能和外在世界沟通。他说最后只有他的心脏、肺和头脑仍能运行。此后他的心脏或肺也会失效，他就会死去。

他告诉我，这是不治之症，它是完全不可预见的，可能在短期或长期内稳定下来，但是永远不可能变好，根本不知道会是在6个月内或是20年内死去。可是他得这病时年龄比大多数病人年轻得多，他们怀疑他会更早而不是更晚死亡。

这个消息无疑是晴天霹雳，但是我的反应对于霍金而言却无济于事。我很清楚地知道他没有信仰，这使我更加难过。因为我知道霍金会质问自己：“为什么是我？为什么得这种病？为什么是现在？”

他只能淡然接受这即将发生在他身上的一切。就我所知，他在那时开始进行一些研究。大约18个月后，皇家学会发表了他的一篇论文，该文对霍伊尔教授的最新引力理论做了些微改正。后来霍伊尔为此表示感谢。这是他研究生涯的开始。那时他仍然是一名研究生，尚未取得博士学位。

伊莎贝尔·霍金

爱德华当时只是一个小孩子，我想他并不十分留意。但是由于大家的注意力都在其他地方，爱德华就没得到他那个年纪应得到的关心。他因此而受苦，尽管他是没感到痛苦的受苦者。而玛丽和这件事接触较多，史蒂芬患病时她待在医院里，所以她也受了苦。

而我的丈夫深受折磨。但是我们终究战胜了它。虽然我丈夫还是死了，但他不是因此事而死去。其他的人也都健在。

我不知道史蒂芬是否意识到，当他患病之初他父亲如何苦思焦虑。他所做的一切努力当然没有告诉史蒂芬，诸如和卡尔顿·伽兹杜塞克联络等。他因为研究库鲁病而获得诺贝尔奖。库鲁病发生在婆罗洲之类的地方，这是由食人肉而传染的，英国根本不会发生这种事。

史蒂芬·霍金

我在那个时期的梦想受到不小的干扰。在诊断出病之前我对生活已经非常厌倦了。似乎没有任何值得做的事情。但是在我出院后不久，我做过一次自己被处死刑的梦。我忽然意识到，如果我被缓刑的话还有许多事情值得做。

我得病的一个体验是：当一个人面临早逝的可能，就会体验到活下去是值得的。

德瑞克·鲍尼

有一天晚上我和他坐在那里，他问道："你读过约翰·但恩的哀歌没有？"我认为但恩的哀歌是我一生中读到的最美的情诗，而且极其坦率。如果不是约翰·但恩的作品，则毫无疑问会被归类成色情类。所以当史蒂芬开始谈论这些时，我记得当时心里想："好孩子，是什么原因使你变成这样子？"我不知道为什么他忽然对但恩的诗这么有兴趣。原来，大约在这个时候，他邂逅了他的妻子——简，尽管我们还被蒙在鼓里。

1963年1月，在圣阿尔班斯的新年酒会上，史蒂芬·霍金遇到了毕业不久的简·瓦尔德。这正是在他要进医院检查之前。次年秋天，简开始在伦敦学习语言。

史蒂芬·霍金

因为我估计自己活不到完成博士论文，所以看来做研究已没有什么意义。然而，病情随着时间流逝似乎缓和了下来。我开始明白广义相对论，并在研究上获得进展。但是真正使我生活改观的是我和一位名叫简·瓦尔德的女士订婚。这使我有了活下去的目标。也就是说，如果我要结婚就必须有一份工作。

1965年史蒂芬·霍金申请剑桥凯尔斯学院，他得到一份研究奖学金。同年7月他和简·瓦尔德结婚。他们的第一个儿子罗伯特出生于1967年，女儿露西出生于1970年，而第二个儿子提莫西出生于1979年。



1965年简·瓦尔德和史蒂芬·霍金在婚礼上，史蒂芬的父母站在他的右边，而她的父母在她的左边

伊莎贝尔·霍金

史蒂芬已经病了。简知道这些，这是史蒂芬的又一次好运：适逢其时遇到适当的人。史蒂芬曾经极其沮丧，他被告知最多只能再活两年半后，并不想继续用功。可是结识了简使他真正奋发起来。他开始用功了。

第3章

1962年史蒂芬·霍金在进剑桥之前，考虑选择研究理论物理的两个领域。一个是研究非常大，即宇宙学；另一个是研究非常小，即基本粒子。然而，他说："因为基本粒子缺乏合适的理论，所以我认为它较不吸引人。他们能做的只不过是和植物学一样把各种粒子分门别类。相反的，在宇宙学方面已有一个定义完好的理论，即爱因斯坦的广义相对论。当时在牛津没人研究宇宙学，而在剑桥的弗雷得·霍伊尔却是英国当代最杰出的天文学家。"

阿尔伯特·爱因斯坦发现了两种相对性理论。第一种称为狭义相对论（1905年），它声称光总是以常速率旅行，光速是一个绝对常数，所有其他运动都是相对的。1916年爱因斯坦发表了有关广义相对论的论文。广义相对论本质上是把引力当作空间—时间几何畸变的结果。

通常几何牵涉到平面上点之间的距离和线之间的角度。然而，在弯曲的表面上，正如地球表面，这些距离和角度不服从适用于平坦表面的同样的几何定律。例如，如果两个人在平坦表面上从不同方向出发离开，他们将越离越远。可是，如果两个人在地球表面上从不同方向出发离开，起初他们将越离越远，最终会在地球的另一端再相遇。

空间—时间几何也牵涉到距离和角度。但是现在人们要考虑事件，也就是不但空间分开而且时间也分开的点。人们是否能以光速或更慢的速度从一个事件到达另一个事件是最重要的问题。

由于引力是空间—时间几何中的畸变结果，所以引力场影响时间和距离的测量。例如，广义相对论预言，在大楼地下室振动的一颗原子应比在顶楼上的相同原子振动得慢。这个效应非常小，但是它已被测量出来，（在一座4层的大楼中！）而且测量结果和预言一致。人们预言，类似的效应（但数值大得多）会发生在非常强的引力场中，像是黑洞附近的引力场。

弗雷得·霍伊尔

“图景”是在宇宙学中明智地使用的词汇。科学具有两个部分。像从量子力学可以得到非常精确的理论，极端精确，任何试图向它挑战的人肯定都是发疯了。

但是在地理学、天文学、宇宙学和生物学中还有另一部分，理论并没有真正地获得证明。它们能被接受，多半依赖于做判断的人。一个众所周知的现象是，只要牵涉到判断，人们就会非常倾向于团结一致；也就是说，如果一开始有一半人做了某个特殊的判断，他们就很快地把另一半人说服了。这是一种群众的天性；我想它可追溯到人类靠狩猎为生的原始时代。要是有20个男人去打猎，最糟的就是对出发的方向不能取得共识；大家一起以随机方式选一个方向共同行动也比各走各的方向好，他们需要整体的力量才能成功。



弗雷得·霍伊尔爵士在剑桥接受教育，并在那里担任普鲁明天文学教授。1967年他帮助建立了理论天文研究所并任第一任所长。他除了写过许多科学著作外，还是科幻小说的多产作家

我们的思想不只受到少数富有魅力的人的影响，也深受我们的能力影响。我们企图避免过于困难的事；如果我们能解答某些方程式，我们就趋之若鹜。但是找寻真理可能要用困难的方式。不能保证宇宙会特别按照我们的智慧标准而造。

我认为“图景”这个词用得好。而且我认为，人们50年以后不会坚持类似于现在的观点。事情会大大改观。正是因为如此，我宁愿去研究具有惊人意义，但我认为可以解决的问题。

> 弗雷得·霍伊尔和科学家赫曼·邦迪以及托马斯·高尔德同为稳态宇宙论的开创者。稳态理论家提出，当宇宙膨胀然后星系间距离越来越远时，物质从无到有创生并充满了宇宙空间。后来这些物质凝聚，形成新的恒星和星系。年轻的新生星系取代了老死的星系，宇宙在任何时刻都和其他时刻极其相像。因此，宇宙是处于一种稳定的状态。
>
> 与之对抗的主导理论是所谓的大爆炸宇宙论。大爆炸宇宙学家对物质从无中生有持否决态度。他们论证道，由于现在星系相互离开，它们过去必定相互靠得更近。宇宙在非常遥远的过去必定和现在相当不同。的确，人们如果用广义相对论的方程式往时间过去的方向追溯星系的运动，他们就会发现，物质密度和引力场曾经一度为无穷大。这一点就是大爆炸。
>
> 现代天文观察似乎强烈支持大爆炸宇宙学。它们指出宇宙的过去和现在非常不同。结果稳态理论不再受支持。然而，霍伊尔相信，这证据是被误解了，所以他继续提倡稳态理论。

史蒂芬·霍金

我到剑桥做研究的申请被接受了。但是使我恼火的是，我的导师不是霍伊尔，而是邓尼斯·西阿玛，我以前没有听说过他。西阿玛和霍伊尔一样信仰稳态理论。根据该理论，宇宙在时间上既无开端又无终结。

然而，最后发现这是最佳的安排。霍伊尔经常在国外，我也许不能经常见到他。另一方面，西阿玛总在那里，他的教导总是发人深思——尽管我们之间经常意见相左。

邓尼斯·西阿玛

那时期稳态理论的提倡者与检验该理论并希望推翻它的观察者之间进行过激烈的争论。我那时支持稳态理论，不是在于要信它一定是正确的，而是我发现它如此吸引人，以至于希望它是真的。所以那时的争论中，我扮演了一个小角色。

开始得到敌对的观察的证据时，弗雷得·霍伊尔主导企图否定这些证据。我在一旁稍微提供协助，提出建议以对付这些敌意的证据。但是当这些证据越积越多，事情变得越发清楚，胜负已定，人们必须抛弃稳态理论。

1965年大概是关键的一年，不仅是因为微波背景，而且由于马丁·赖尔，这位剑桥首位的射电天文学家，推动居于领导地位的射电源计数的研究。在后来阶段，他甚至使像我这样的附和者都改弦更张。

在我开始研究广义相对论的时期，世界上只有寥寥数人以认真的态度开展这种研究。然后在20世纪60年代初，这个学科在我们面前迅速扩展开来。这有一部分原因是相对论越来越令人振奋，另一部分原因是天文学上的新进展。



邓尼斯·西阿玛从1963年至1970年任剑桥大学的数学讲师，从1970年至1985年任牛津万灵学院的天体物理教授，现在意大利的里雅斯特的国际理论物理中心工作。他是史蒂芬·霍金在剑桥的导师

最早的进展发生于1952年左右，人们从两个地方探测到无线电噪声，一是从称为射电星的点状来源，另一个是从我们星系的弥散区域。电子在各种星系的磁场中运动产生这些噪声。但是关键在于这些电子实际上是以光速来运动：它们是我们讲的相对论性运动的宇宙线电子。这里的观念是，射电天文学现象的所有范围是由相对论性电子引起的，这种电子原先多半是相对论专家研究的东西，这些专家很少涉及天文学。相对论性电子是用一些大片金属探测到的。

相对论的抽象概念和观察射电发射的具体方法之间的关联非常令人兴奋。这也许是现代物理概念以观察方式进入天文学的转折点。

我们跨出第一步之后就无法停止了。几乎每一年都有激动人心的新发现，这样就把现代物理的最奇异性质带进了直接天文观测。人们发现

了类星体和脉冲星以及从宇宙的大爆炸起始来的热辐射；而且由于类星体被认为和引力坍缩相关，甚至广义相对论也变得重要了。[1]

你看，狭义相对论是爱因斯坦的两个相对论理论的第一个，这就是每一位物理学家都必须学习的理论部分。但是他的引力论，即广义相对论要更复杂而且抽象得多，过去这只是非常内行的专家的特殊领域。可是当人们认为引力坍缩在解释类星体很重要时，广义相对论在天体物理中，一下子就变得十分重要了。当然，如果你要研究具有辐射背景的宇宙大爆炸起源，则只能用广义相对论才能解释宇宙学。正是这种抽象和具体结合的进展，才导致相对论魅力的大增。

这样非常自然地，在20世纪60年代我和一些似乎在这些困难领域具有研究才能的学生在剑桥建立一个学派时，这些正是我建议他们研究的领域。

> 没有恒星能够永远存活下去；恒星在某个阶段必须把燃料烧光。许多恒星变成白矮星，这是一种稳定的、半径为几千英里、密度为每立方英寸大约有几百吨的小恒星。其他恒星继续坍缩，直至它们成为半径只有十英里、密度为每立方英寸大约有几亿吨的、比白矮星小得多的中子星。人们相信，超过一定尺度极限的其他恒星会坍缩成一个所谓的黑洞。一个黑洞被称为事件视界的球面所环绕。事件视界面是一个单向膜。虽然可能从事件视界面的外界进入黑洞，却没有任何东西——包括光线能在相反的方向上旅行。在事件视界面中，黑洞中心是一个奇点，该处的引力场变成无穷强。任何进入视界的人最终都会撞到奇点上去，结局非常悲惨。

基普·索恩

恒星的引力坍缩和黑洞理论是在20世纪30年代后期开始形成的。罗伯特·奥本海默和真正开始研究这个课题的学生从列夫·朗道更早的工作出发。朗道是苏联现代理论物理之父。

朗道曾经为恒星如何得到使自己发热的能量问题感到迷惑；他设计过一种机制，在恒星譬如太阳的中心，也许有一个尺度为10千米或20千米、质量大约为太阳质量1/10的中子星；而太阳的气体逐渐落到这个中子星上去。这种沉落会产生使太阳发热的热量。在20世纪30年代，他自

己思索，并在与合作者讨论中揣摩这些思想。

可是，后来他感到斯大林清算之火马上就要向他扑来。这时他绝望地搜索某些能在报纸上炫耀的，并能使他免受斯大林清算的东西。由于朗道20世纪30年代早期在德国生活了很久，并在那里研究物理学，所以他受到怀疑。正因为如此，尽管他是一名犹太人，他仍然被某些苏联物理学家控告为德国间谍。



基普·索恩在1962年从加州理工学院获得学士学位，1965年在约翰·惠勒指导下获得普林斯顿物理学的博士学位。他现在任加州理工学院的小威廉·R.肯南教授以及理论物理教授

朗道寄了一份手稿给哥本哈根的玻尔[2]，其中包括太阳是由在它中心的中子核来维持发热的思想。他还附了一封信要求说，如果玻尔认为这是一个好思想，就请他转给《自然》发表。玻尔做到了这点，他紧接着收到从《消息报》发来的一封电报，问玻尔对这个工作的看法。玻尔回了一份热情洋溢的报告，《消息报》立即发表了这份报告。

玻尔知道朗道是企图躲过牢狱之灾，可惜不管用。朗道在监牢里待了一年而且几乎丧命。

在朗道入狱期间，奥本海默和他的学生玻帕·塞伯读到朗道理论并且发现了一个漏洞。他们思忖：“好，朗道能够获得热量来源，他毕竟是一位伟大的物理学家。”这样他们就在《物理学评论》上发表了一篇文章，在朗道囚禁期间把他的思想粉碎。

朗道的文章使奥本海默和他的学生开始思考中子星和黑洞，但是他们并不知道那篇文章是朗道企图用来逃避牢狱之灾的。

由于苏联科学界的巨大压力，朗道在入狱大约一年后被释放。他的健康状况很差。但是，我认为在西方，直到最近人们才知道，这是奥本海默和他的学生哈特兰德·斯尼德获取黑洞理论努力的契机。斯尼德在师从奥本海默之前是犹他州的货车司机。

奥本海默和斯尼德在发现太阳和其他恒星不能由中子的核心来维持发热状态后，首先想了解的是：假定你有一颗作为正常恒星死亡残骸的中子星，它们有多大？奥本海默和另一名学生乔治·沃尔科夫指出，中子星的最大质量估计为太阳质量的0.7倍，中子星不能比这更大。因为我们现在对核物理理解得更清楚，所以这个质量极限更可能是太阳质量的两倍。

看到中子星存在一个可能的最大质量，奥本海默采取的下一步骤是问自己：当大质量恒星死亡时会发生什么？奥本海默和斯尼德利用广义相对论计算了恒星的内向爆炸，他们看到了恒星会和外界宇宙相脱离，用我们今天使用的新奇的词汇来说就是：“进入到它自身的视界之内。”

然而，他们拒绝考虑在视界之内恒星会发生什么问题；他们从方程式中就看到了恒星和宇宙其他部分脱离开来。奥本海默不是一个善于猜测的人。否则的话，他会看到非常复杂的物理问题，确定其中发生的关键过程，从而解决问题并做出预言，这些也正是用于制造原子弹所需要的手段。可是他甚至拒绝用广义相对论来解答在视界之内发生的问题，这正是最近随着史蒂芬·霍金关于量子引力的工作而变得如此有趣的问题。

史蒂芬·霍金在1974年发现，当考虑到量子力学效应时，事件视界不再严格地不可穿透。黑洞辐射能量，并且损失质量。黑洞的质

量越大，则它的质量损失得越慢。这个效应对于恒星质量的黑洞而言是非常小的。尽管如此，所有的黑洞最终都会把它们的所有质量辐射殆尽并且从此消失。

直到大约1910年，人们还认为，物质是由像撞球那样的粒子所构成，这种粒子具有确定的位置和速度，物理定律可以准确地预言它的行为。然而，从实验中开始出现的一些证据显示，这些准确的所谓经典定律，在非常短的距离下，必须用所谓的量子定律取代。按照这些量子定律，粒子没有精确定义的位置或速度，而是以一种概率分布，或以波函数的方式抹平开来，波函数测量在不同位置找到该粒子的概率。量子定律显示，人们不能同时测量一个粒子的位置和速度。人们对位置测量得越精确，则对速度测量得就越不精确。反之亦然。

在强引力场中，广义相讨论的新奇特征最为显著。量子力学的特征在小距离尺度下最为显著。这样，空间—时间几何的量子力学理论，即量子引力对于理解发生在非常小尺度和牵涉到强引力场的事件时是基本的。其中一个事件便是大爆炸，另一个事件是发生在一个黑洞之中。



量子空间中一个黑洞的图解：在该处光不能逃脱，时间终结。然而黑洞并非像过去人们所认为的那样是黑的

安东尼·赫维许

当射电望远镜首次从宇宙获得射电波时，其装置还是非常粗糙的。人们在加州的巴勒摩利用大型光学望远镜把第一个辐射射电波的星系认证出来时，真是令人激动。这些奇怪的物体，那时我们还不知道是什么，其实就是在天空发射射电波的点。可是，它们又是什么呢？它们不

是太阳，也不是任何已知的恒星。

人们发现用光学望远镜只能看到一个暗淡的斑点。我们知道这个斑点实际上是一类以前从未看到过的星系，距离我们大约10亿光年。这样，我们利用简易的仪器就能发现极其遥远的星系，所看到的是10亿年前的历史。很明显，如果我们用更好的装置，就可以检测到比这种用射电望远镜观测到的更暗淡的，也就是更远的物体。

这样一来，向时间的过去方向回溯宇宙的历史，从而用来检验相互竞争的各种宇宙论便成为理所当然。在这以前，宇宙论只是理论家之间的战争。而现在它成为我们可以称之为观察的科学，某种我们可以真正观察到的东西。

我们现在可以看到太空的更深处，掀开帘幕使我们看到了宇宙的过去。



安东尼·赫维许由于发现脉冲星而与马丁·赖尔爵士一起获得1974年的诺贝尔物理奖。这个发现证

明了中子星的存在，并使黑洞的现象更具可能性。他从1971年起任剑桥射电天文学教授

当你往时间的过去方向观测所发现的这类射电星系的数目，比霍伊尔、邦迪和高尔德的稳态宇宙理论所能包容的数目多得多。在稳态理论的宇宙中，恒星和星系一面形成，一面衰变。可是随着宇宙的膨胀，必须添加上物质，使之形成新的恒星和星系，才能使宇宙的图像平均来说在不同时间显得是同样的，这一点大家都同意。如果宇宙处于一种稳态，一种平衡，只要你愿意在不同时刻观测它的话，它应该在平均上显得不变。这样，如果你观测非常遥远的物体，那么你就能看到时间的过去，就能看到宇宙的过去和现在是否相同。

从射电望远镜得到的第一个结果暗示我们，我们有一个非常不同的宇宙。它具有的射电星系数目比一个光滑的、稳态的宇宙所应有的多得多。因此宇宙不是处于一种连续创造的状态。它更显得是随着时间演化的。

射电星系的研究看来非常明确地指出，宇宙具有演化的历史。这在1965年获得了戏剧性的证实。美国的阿诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊用他们的射电望远镜接收到宇宙背景辐射。这是从创造宇宙的热大爆炸遗留下来的残余热辐射。它证实了宇宙不能处于稳态。

他们的射电望远镜收到的微弱热辐射非常冷，它刚好对应于比三度开尔文更低的温度的天空背景，这的确是非常冷。但是如果你在宇宙学中弄清这些辐射的起源，它就告诉你宇宙的过去一度曾经是不可想象地炽热，其温度为几百万度。我们现在所接收到的只是一种残余，是宇宙极早期的辐射化石。这些和大爆炸——也就是由突然创造引起大爆炸的思想相符。

从我们接收到的这种辐射化石说明了：在遥远的过去存在一个非常热、非常紧密的宇宙。或者粗略地讲，你可想象这是一种开启万物生涯的宇宙爆炸。我们现在看到它正随着时间膨胀并逐渐冷却下来。

邓尼斯·西阿玛

我还记得在剑桥的有关脉冲星的学术报告会。我想那次演讲的题目《一种新的射电源族》是很乏味的。安东尼·赫维许准备演讲。但是谣传说，它不仅仅是什么枯燥的射电源新族，而是某种更壮观的、更瑰丽的

东西。会议从通常的射电天文学家教室移到一间非常大的演讲厅，还是被挤得水泄不通。这个谣言流传得很广。

脉冲星就是在这次会议上第一次发表的。关于它们究竟是什么，进行了一些讨论。很显然，它们必须是非常紧密的物体，可是不清楚它们是否为白矮星，这种非常紧密的物体虽然非常奇异，却是天文学家非常熟悉的。它们或许是所谓的中子星。它们比白矮星紧密得多，或者可以说几乎处于黑洞状态。这是花了几个月的时间才讨论清楚。托马斯·高尔德，这位早先和霍伊尔以及邦迪在剑桥的合作者，首次清晰地论证：脉冲星只能是旋转的中子星，而不是别的什么东西。

这样，过去纯粹是理论的构造，而且从未被天文学家认真看待过的紧密物体，忽然间变成全世界射电天文学家都能观测到的、处于某类射电源中心的物体。此外，由于中子星几乎是处于黑洞的条件，中子星的半径只比同等质量黑洞的半径大几倍，那些认真接受黑洞概念的人因此信心百倍。

安东尼·赫维许

回到20世纪30年代，当詹姆斯·查德威克发现中子时，人们用计算推测出一种非常奇怪的物体。引力是一种极其巨大的力量。一颗恒星把燃料用光时，引力甚至就会把该恒星从太阳尺度凝聚成直径只有几英里的球，把恒星中的大部分物质转变成这些中子。它似乎把物体压扁、使之不存在，把正负电荷挤压得如此紧密，使它们聚合成新类型的粒子。

这样，人们猜想中子星也许存在。我在剑桥进行的实验真正直接导致这类物体的发现。这真是很幸运。我所设计的实验，实际上是用于观察类星体。我发现，如果通过太阳大气来观看某些射电星系，它们就会像恒星一样闪烁。但是，这只有当它们具有典型的类星体不可思议的紧密尺度时才会发生。类星体是功率极大的星系，可是它们的能源来自于它们中间非常微小的体积。它们是如此高度紧密的物体，以至于用射电望远镜观测时也是非常小的，人们正是透过这种闪烁现象来鉴别它们。它是正常扩展的射电星系呢，还是在它当中具有某种紧密结构的东西？

所以我设计了一种射电望远镜，它不像过去的射电天文学中见到的任何东西；它是用来观察这种闪烁效应的，这显示它具有和任何其他东

西完全不相像的性质。它在长波段工作；我们反复地观测天空，为了寻找起伏的源。没过多久，我们就接收到这种脉冲。望远镜的参数刚好调到适合于接收脉冲，这是我们的运气。

这些脉冲星被归结成旋转的中子星。这个发现是在1967年进行的，而在1968年广为人知。那时候我们不知道它们是什么，但是它们必须很小才行。我在第一篇发表的文章中建议，这是振动中子星，或者是振动白矮星，但是中子星的可能性更大些。这种想法在12个月后得到证实，中子星从此进入了天体物理的领域。

这一切是如此激动人心。我指的是，谁会梦想到你会从天空接收到似乎是智慧的信号呢？天空中究竟什么东西在发射脉冲呢？我们考虑了所有种类的事物，再加以排除，譬如说未知的美国飞机或者从月亮反射回来的信号等。这些局部的可能性都被排除后，我开始认真地思索，我们也许首次接收到真正的、智慧的信号，这是从某个天外文明来的信号，我们将其称为“小绿人”。

然而，我的研究生约瑟琳·贝尔进一步检查记录，使我们得到了越来越多的这种脉冲信号，最后事情变得清楚了：我们必须去寻求其他解释，它不是小绿人，尽管我有一阵把它当真，你不能轻易地把它赶走。

这正如一则侦探故事：结果只有一个答案，也就是说，只有一个犯罪的人。把行星运动排除了之后，我就知道，脉冲不能来自于一个行星。该脉冲非常狭窄，这显示该发射物体非常小。由于从大物体不同部分出发的辐射旅行时间不同，因此你不能指望它发射出短的、尖锐的脉冲。它必须是某种非常紧密的东西，必须是尺度比几千公里更小的物体，而且在恒星那样远的地方。

史蒂芬·霍金

我参加了宣布发现脉冲星的演讲会。演讲厅里装饰着纸剪的小绿人。最先发现的4颗脉冲星被命名为从一到四的LGM。“LGM”是“小绿人”的缩写。

基普·索恩

我是在一次广义相对论和引力的国际会议上首次见到史蒂芬。我刚得到博士学位，而史蒂芬正处在他的剑桥博士论文研究的晚期。那时他拄一根拐杖走路，有一点摇摇晃晃的。可是他讲话非常清楚，稍微有点迟疑。我直到后来才真正理解他疾病的含义。

这次会议，是在史蒂芬研究宇宙学奇点工作的早期召开的。他的研究是用罗杰·彭罗斯开创的技术，来研究宇宙的大尺度结构。我们在休息室里短暂交谈，使我对他所进行的研究以及发展的思想留下十分深刻的印象。很清楚，这是根据彭罗斯设计的基本技巧。彭罗斯把它们应用到黑洞的框架中，而霍金把它们引进到宇宙的框架中。

史蒂芬也许是唯一的强有力的具有这种本领的人，他比其他任何人都要快得多地进入这一切。他掌握了技巧，开始应用它们，并且如此迅速地出发，任何其他人都望尘莫及。现在我回顾起来，这是非常明显要做的事。但是人们总是惊讶，人们回顾的观点究竟多少代表实在的情形。

罗杰·彭罗斯

我记得曾和我的朋友厄弗·罗宾逊进行热烈交谈，我们接着穿过一条街道。在我们穿越时，交谈自然停止。然后我们到了另一边。在穿过马路时，我显然得到某种观念，可是交谈又重新开始，它在我头脑中被完全遮盖了。只有当我的朋友离开后，我开始有一种兴奋莫名的感觉，一种非常美好的感觉，然而我搞不懂为什么有这种感觉。所以我把整天的活动回顾一遍，去寻找任何会引起这种感觉的事件。接着我逐渐地把我穿过马路时所获得的这个思想观念挖掘出来。



史蒂芬·霍金的毕业论文是由罗杰·彭罗斯和邓尼斯·西阿玛会试，该论文是对彭罗斯关于在一颗恒星把自己燃料烧尽并坍缩成一个黑洞时的过程研究的发展。彭罗斯现任牛津数学研究所的罗斯·玻勒数学教授

彭罗斯的观念显示，如果一颗恒星坍缩超过一定程度，它将不可能再膨胀。相反的，空间—时间的一个奇点将会发生，在这一点，时间将会终结并且物理定律会失效。在彭罗斯的结论之前，人们以为，如果一颗恒星不是完美的球形或者恒星稍微旋转，则该坍缩恒星的物质可避免导致无限紧密。相反的，坍缩物质也许会高速穿越并重新膨胀。

邓尼斯·西阿玛

彭罗斯宣布了他的结论：当一些恒星不断地坍缩下去，只要满足某些非常广泛的条件，而且是任何人都会认为合理的条件，它们就会变成一个奇点。

史蒂芬·霍金开始第三年研究生课程时，我记得他曾说过：“这个结论非常有趣，我在想是否可以用来理解宇宙的开端。”他的想法是，只要你在心理上把时间逆转，就可把膨胀的宇宙认为是一个坍缩的系统；它有点像一个非常巨大的坍缩星。人们同样可以考虑：在那种时间意义上，当宇宙坍缩时，它达到一个奇点。或者在正常的时间意义上，我们得到从大爆炸起源的爆发。在非常对称的宇宙模型中，这爆发肯定是奇性的。

史蒂芬接着说：“也许和彭罗斯恒星定理相同的考虑也能成立。”也就是说，甚至在一个实际上不规则的宇宙中，开端也许必须是奇性的。它再次不仅仅是一个有趣的结果，由于它意味着广义相对论在宇宙最开初时无效，所以导致智慧的危机。因此，史蒂芬说：“我想把彭罗斯的结论应用到整个宇宙上。”

他在研究生的最后一年做到了这一点。

采取彭罗斯的方法绝非易事，但结果非常杰出。如果你翻阅史蒂芬的论文就知道，最后一章包含了他解释宇宙开端的第一道奇性定理。

史蒂芬·霍金

彭罗斯的结论就是第一道奇性定理。为了证明，彭罗斯把某些全新的技术引进广义相对论。我没有出席他在伦敦的定理发表会，可是第二天我听到了。因为我正在考虑相当类似的问题，过去是否有奇点作为时间的起点，或者宇宙早先是否有过一个收缩过程和反弹。我能够利用彭罗斯和我自己的一些方法显示：如果经典广义相对论是正确的，则在过去必须有一个奇点，这正是时间的开端。任何可能存在此奇点之前的东西都不能被认为是宇宙的一部分。

白纳德·卡尔

史蒂芬和罗杰·彭罗斯是两位伟大的相对论家，他们研究非常类似的问题。他们最后得到了著名的定理，在宇宙的开端处必须存在奇点，也就是相对论失效的地方。他们的发现在某种意义上可以视为：广义相对论在非常特殊的情况下预言了自身的失效。


白纳德·卡尔跟随史蒂芬·霍金做他的研究生论文。1974年他还伴随霍金一家到加州理工学院，他在那里帮助照顾史蒂芬。他目前在伦敦大学的玛丽皇后和西费尔德学院教物理

奇点以两种情况出现，它们在黑洞的中心出现，这是罗杰·彭罗斯证明出来的；但是我们还能指出，在极早期宇宙中必须存在一个奇点，这是霍金和彭罗斯共同证明的。

如果经典相对论在奇点处失效的话，究竟会发生什么？人们只要说，因为我们知道理论失效了，所以就放弃算了。当然，量子引力的目标正是为了解决这个问题。

史蒂芬·霍金

对远处星系的观测显示，它们正离我们而去，宇宙正在膨胀。这指出星系在过去必须靠得更近。由此就产生了这个问题：是否在过去的某一时刻，所有星系都互相叠在一起，而宇宙的密度为无限大？或者原先

存在一个收缩的相，星系在这种相中能够避免相互撞到一起？也许它们会相互穿越并重新开始相互离开？这个问题需要新的数学工具才能回答。这些工具主要是由罗杰·彭罗斯和我在1965年和1970年间发展的。我们利用这些工具指出，如果广义相对论正确的话，过去必须存在过无限紧密的状态。

这个无限紧密的状态被称为大爆炸奇点，它是宇宙的开端。所有已知的科学定律在奇点处失效。这意味着，如果广义相对论正确的话，则科学不能预言宇宙是如何开始的。然而，我更近期的工作指明，如果我们加上量子力学的理论，也就是非常小尺度的理论，则可以预言宇宙是如何开始的。

基普·索恩

在20世纪50年代或更早的时期，广义相对论大体上是数学的一个分支；把它引进物理学，主要应归功于普林斯顿大学的约翰·惠勒。物理学家询问真实世界的问题，诸如什么是基本粒子的性质、基本粒子由什么构成等，而几十年来广义相对论的权威人士一个典型的课题是，他们想以数学上严谨的方式，推论出制约在弯曲空间—时间中理想粒子的运动定律。这个课题的动机主要是想找出广义相对论结构更深入的数学解释，而不是要深入了解宇宙本质的核心。

所以20世纪50年代是思考弯曲空间—时间的方式剧变的时期，从考察数学结构到开始按照物理来思考。这要归功于惠勒，有些人称他为黑洞的鼓吹者。由于他的热情，令人信服地洞察出黑洞是物理中最激动人心的问题，是要真正理解宇宙和物理基本定律的人所应该研究的。

大约在这个时期，约翰到剑桥演讲，他强烈影响了邓尼斯·西阿玛小组的成员，最终也影响了史蒂芬·霍金。他对物理学中什么问题重要有极好的判断力，他说服我们相信黑洞正是未来物理发展的中心。

约翰·惠勒

1969年，我们在纽约市阿姆斯特丹大道的太空物理研究所开会。我说，在做最后结论之前，还必须把另一个东西提出来，这就是引力完全坍缩的物体。而你在重复诸如“引力完全坍缩物体”之类的用词10次以

后，就会觉得必须有一个更好的名字。这就是我开始使用“黑洞”这个术语的缘由。



约翰·惠勒是8本书的编者、合作者或作者。他是奥斯汀得克萨斯大学和普林斯顿大学的名誉教授。他获得16所大学的名誉学位。他在1969年创造了“黑洞”这个术语

布兰登·卡特

奥本海默最先开始思考黑洞的含义和形成，不过黑洞这名称是20年后才出现的。可是直到20世纪50年代人们才接下去研究。尤其是约翰·惠勒贡献良多。在英国，关键人物是我的导师，也是史蒂芬·霍金的导师邓尼斯·西阿玛。邓尼斯在英国和惠勒一样起带头作用：他使大家产生兴趣。罗杰·彭罗斯便是其中一人。彭罗斯独一无二的贡献是把许多现代数学的方法、高等拓扑学和微分几何用来解决纯理论数学家从未想去着手解决的问题。

“黑洞”这个名词的发明使事情大为改观。没有通俗的词汇，则不仅和其他领域的人——甚至和专家交流都很困难。由于缺少一个词，实际上在研究同样问题的人彼此都不知道。



布兰登·卡特生于澳大利亚，在剑桥彭蒙布洛克学院学完本科之前在苏格兰受教育。他继续在剑桥的应用数学和理论物理系研究和教学。1975年他在法国国立科学研究中心工作。1986年他成为巴黎天文台的研究主任

约翰·惠勒发明了这个术语后，情形就戏剧性地改观了。这并非第一个名称，以往还用过其他术语，可惜不受欢迎。在全世界，无论是在苏联、美国、英国和其他地方，所有人都采纳它，他们都知道是在讲同一件东西。不仅如此，整套概念一下子就传到大众中去，甚至科幻作家也能对此说三道四。

约翰·惠勒

朋友们问我："如果黑洞是黑的，你怎么能看到它呢？"而我答道："你曾经去过舞会吗？你看到过年轻的男孩穿着黑色晚礼服而女孩穿着白衣裳在四周环绕着，他们手挽着手，然后灯光变暗的情景吗？你只能看到这些女孩，所以女孩是正常恒星，而男孩是黑洞。你看不到这些男孩，更看不到黑洞。但是女孩的环绕使你坚信，有种力量维持她在轨道上运转。"

史蒂芬·霍金

掉入黑洞中成为科学幻想的恐怖。可是实际上，黑洞现在可以说是真正的科学事实。

当然科幻作家大书特书的是，如果你真的掉进黑洞中将会发生什么。一般看法认为，如果黑洞在旋转，你就可以穿过空间—时间中一个小小的洞，而通到宇宙的另一个区域去。这显然为空间旅行提供了极大的可能。的确，如果我们要旅行到其他恒星，不用说到其他星系去，要使这种愿望将来可行，需要这样的可能性。否则的话，没有任何东西能比光旅行得更快这个事实表示，到最近的恒星来回旅行至少要花8年时间。所以别想到α—半人马座度周末了。另一方面，如果人们能穿过一个黑洞，也许他可以在宇宙任何地方重新出现。如何选择你的目的地则完全不清楚：也许你想到处女座度假，而结果却到达蟹状星云。

但是，我只能遗憾地使期望星际旅行的观光客失望，这个假设是不成立的；如果你跳进一个黑洞，你会被撕裂并被压榨到完全不存在。然而，在某种意义上可以说，组成你身体的粒子继续在其他宇宙中存在下去。我怀疑对于进入黑洞而被压制成像面条的人而言，知道自己的粒子也许还会存在是否会感到一些安慰。

约翰·泰勒

如果有一个黑洞非常大，由质量相当于我们星系的物质所构成，那么它的事件视界大约具有太阳系的半径。个人从事件视界掉落时没有任何特殊的感觉。然后，大约一个礼拜后，他开始感觉到压迫，被拉得越来越长，而且变得稍微瘦一些。当然，他开始被压挤，直到变得非常长非常细，而且相当难看。两周以后他就会落到黑洞中心，然后死去。那

当然是引力坍缩的问题。

可是在中心发生了什么呢？在中心，标准引力加上一点经典物理就告诉你，你会消失。这真荒谬。这太糟糕了，你正在毁灭用来做这些预言的整个模型结构。



约翰·泰勒是伦敦国王学院的数学教授。20世纪70年代他进行了许多有关黑洞的研究，写了一本这个课题的畅销书。最近他从研究宇宙学改为研究神经系统

事实上，有一次我曾充当论文竞赛的裁判，其论题是如何通过黑洞并且生存下来。我面临的问题是不知如何评奖。如果我说“哎，那似乎是篇好论文”，则求证它的正确性的唯一方法是按照实验落到黑洞中去——我假想你会要求该论文作者和你同行。可是问题在于，如何把结果告诉世界上其余的人？你是否得带着要颁给他们的奖一起去呢？他们到达中心时要如何处理那个奖呢？

实际上，由落到黑洞中心的物体会突然消失这个事实可知，引力和

经典物理模型本身包含了它毁灭的原因。现在，它也许在最后的十万亿亿亿亿亿分之一秒的时间里被极力压缩，就在那一时刻起，时间和空间的性质大大地改变了。而且为了检测那最后的、绝对短暂的时间，随着所有物质流进去并且坍缩，它自身压缩并加热而得到非常高的能量，所以人们必须使用极高能量的效应。换句话说，你要重新经历一遍整个宇宙的开端，你回到了非常坍缩的状态。

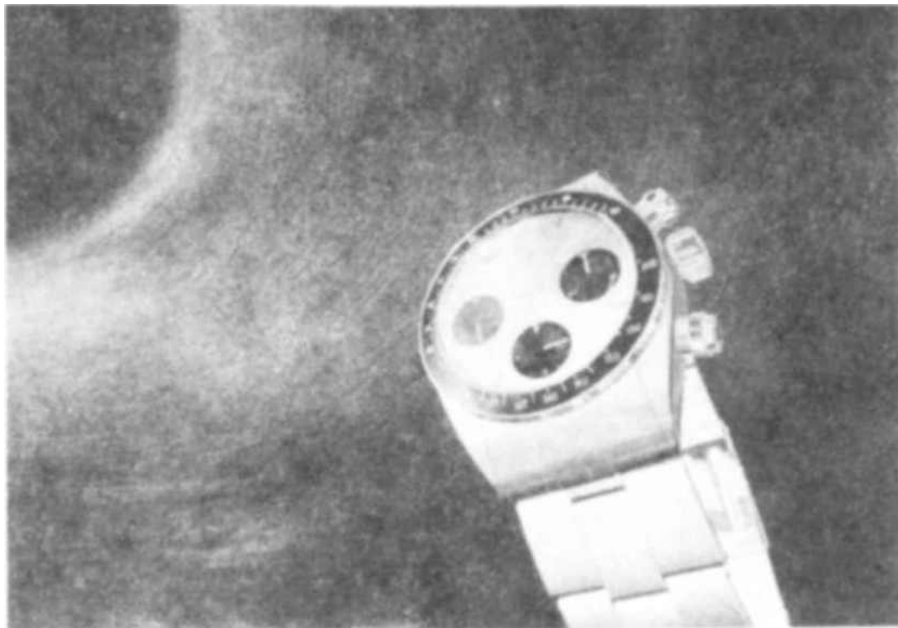
为了描述它，我们需要这些量子效应，也就是使你避免实际消失的不确定性效应。可有许多原因用来解释所发生的。就第一原因而言，一个非常好的、并且也许是正确脱离这困境的原因是：当你回溯过去，从而不断趋近大爆炸的开端，就能避免被毁灭；或者当你落到一个黑洞的中心去，时间在流逝——你的手表时间，当然你的手表或手腕都很悲惨地毁灭——但是活动在继续进行，而时间就是活动。现在，当你越来越接近中心，也许是活动时间扩展开来，这样你不仅仅是必须度过十万亿亿亿亿亿分之一秒，你不断地向黑洞中心接近，但永远不能到达，因为总有新的活动发生。可以想象一个无穷层数的洋葱，你一层一层地把它剥开，在有限的时间里只能剥一层，而你想到达该洋葱的中心。当你每剥一层时，它就是一个新的活动，你可以好比一秒钟剥一层。掉到黑洞去的情景很可能就像是这个样子。我认为，宇宙的开端最可能像这种样子。在这种情形下，如果永远有活动可以回溯，则永远不会出现开端，时间被不断地延伸，因此不可能存在最初原因。我们探究最初原因，是因为我们不理解时间在那种非常奇怪、非常奇妙的环境下受到如此重大的改变。这些正是我们所要适当考虑的。

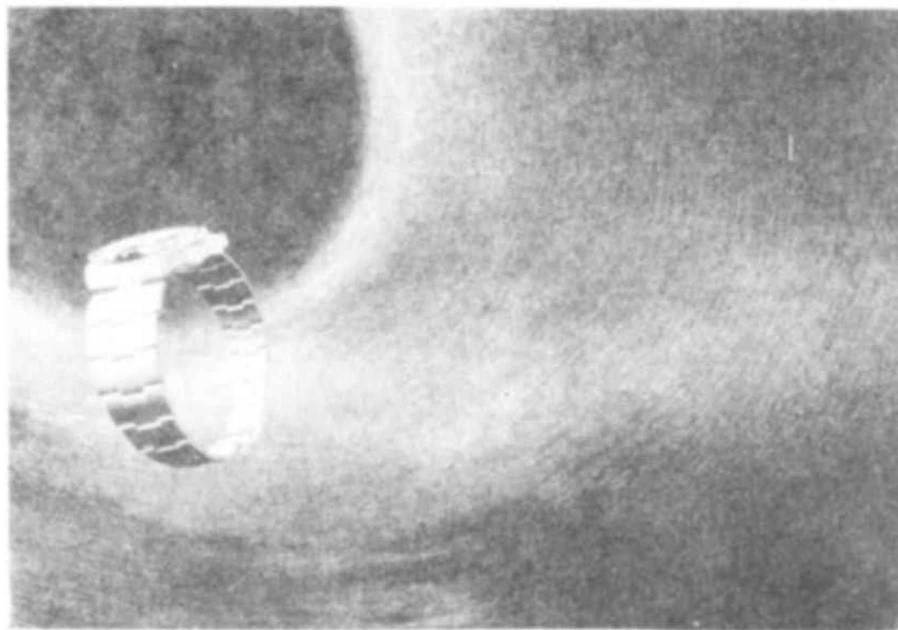
当一个人掉进黑洞里去，他当然可以回头看。正如你所预料到的，他能看到一起掉进去的其他东西。当一个人掉进去时，他将看到非常奇异的变形。如果一个人躲开奇性的环，他就可穿越到另一个更遥远的宇宙去。该宇宙在一定程度上是我们自己这宇宙的翻版。但是我们不知道它的演化过程是否和我们的宇宙一样。

例如，人们可以猜测，他也许根本不能遇到自己的星球以及自己的同类：也许那边环境完全不同。想知道这些宇宙中会发生什么事会想破脑袋。

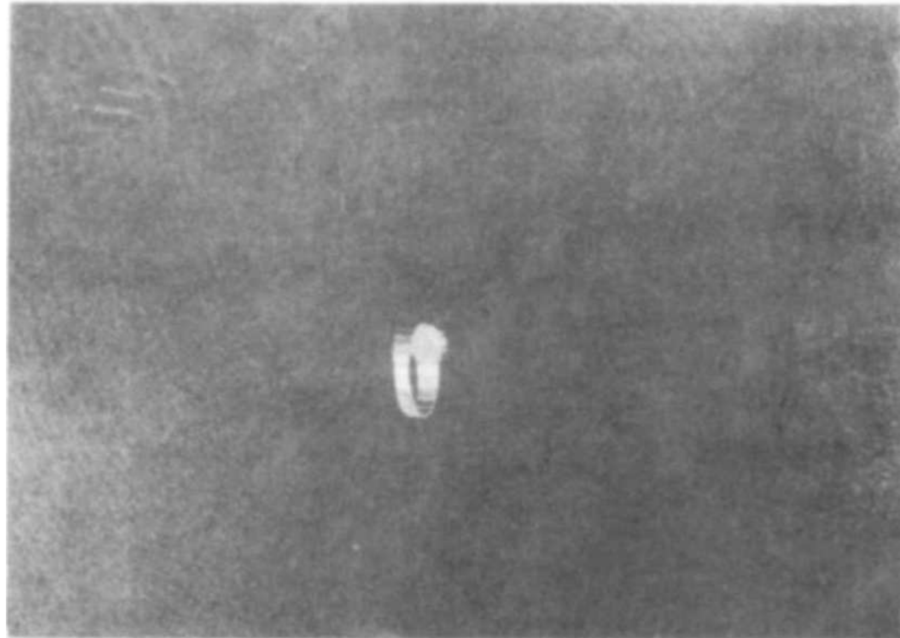
布兰登·卡特

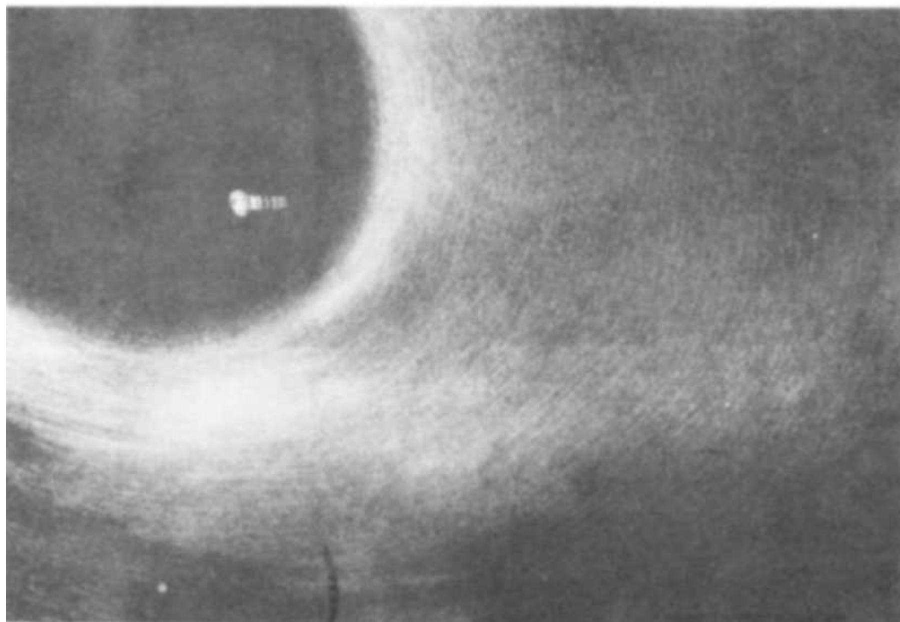
就在你看不到外面世界之前，你会看到一些事件发生，看到它们发生的速度正如烟火表演那么快。虽然你能看到未来发生的每一件事，但是从科学的观点看，它进行得如此之快，你根本没有时间去分析，这真是令人沮丧。你无法全部吸收，最后事情会爆发得如此快，以至于连你本身都被它毁灭。这是结束一个人生命非常刺激的方式。如果有机会的话，我会采用这种方式。





黑洞中的时间。钟表永远到达不了午夜，没有人能到达黑洞中心





史蒂芬·霍金

我女儿露西出生后不久的一个晚上，当我要上床时，我开始思考黑洞的问题。我的残废使得上床这个过程相当慢，所以我有许多时间。我忽然意识到事件视界的面积总是随着时间增加。我对自己的发现如此之

激动，以至于当晚没有睡多少。事件视界的面积增加，暗示黑洞具有熵的含量，它测量黑洞所包含的无序度。而且如果黑洞具有熵，它就必须有温度。然而，如果你把铁钳放在火中加热，它会发红并发出辐射。可是黑洞不能发出辐射，因为没有任何东西可从黑洞逃出来。

邓尼斯·西阿玛

1974年，史蒂芬·霍金首次发表关于辐射黑洞的著名文章。实际发生的过程是，一位以色列科学家雅各布·伯肯斯坦在之前一两年建议，黑洞有些古怪性质使它们看起来像热力学系统。伯肯斯坦建议，也许黑洞正如平常热体一样具有温度和熵，其温度与黑洞的质量成反比。那就意味着小质量的黑洞比大质量的黑洞更热，熵与黑洞水平的面积成正比。[3]

> 热力学是物理学的一个分支，它研究热和能量的关系。热力学第二定律也许是最著名的。它指出，一个孤立系统的熵或无序度总是增加：鸡蛋一旦掉到地上被打碎，不太可能再恢复成原先的形状。

史蒂芬·霍金

广义相对论是所谓的经典理论。它对每一个粒子预言一条单独的、确定的途径。但是根据量子力学，这个20世纪另一伟大的理论，粒子存在机遇和不确定的因素。1973年访问莫斯科时，我和雅可夫·捷尔多维奇，这位苏联氢弹之父讨论量子力学在黑洞中的效应。此后不久我有一个最令人惊奇的发现。我发现粒子会从事件视界漏出来而且逃离黑洞。

我首先告诉了西阿玛这个发现，但是很快就意识到纸包不住火，这个消息保不住。在我吃生日大餐时，接到了罗杰·彭罗斯的电话。他非常兴奋，讲了又讲，以至于我的大餐完全冷了。那是我非常喜爱的鹅肉，所以很可惜。

约翰·惠勒

有一天雅各布·伯肯斯坦走进我的办公室。“雅各布，”我说，“当我把一个热茶杯放在一个冷茶杯旁边时，总是感到很不安。我让热从一个

杯子流到另一个杯子，增加了宇宙的无序度，我犯的罪过永远在时间长廊中不断回响。可是，雅各布，如果有一个黑洞在附近徘徊，而我只要把这两个茶杯都扔进去，不就销毁了犯罪证据，是吗？”

雅各布看起来有些困惑，后来他回来告诉我：“不，你并没有销毁犯罪的证据。黑洞把你所有发生的事记录了下来。所以黑洞的熵，也就是无序度增加了，因此永远会显现你的罪证。”

黑洞的无序度是多少，伯肯斯坦提供了一个近似值。史蒂芬·霍金和布兰登·卡特读到了伯肯斯坦的结论，他们感到非常困扰，甚至着手去证明这是错的。可是，他们越研究就越发现和他的结论一致。史蒂芬·霍金甚至研究得更深远，他设计出一个方案，用来理解粒子如何从黑洞逃出来以及黑洞的温度不仅是理论上的温度，而且是粒子从黑洞蒸发出来时的真实温度。

黑洞并不是完全黑的。跟太阳一般大的黑洞的大约温度是高于绝对零度的一百万分之一度——很微小，不过仍是有温度。

史蒂芬·霍金

在我和布兰登·卡特合写的一篇文章中，我们指出了伯肯斯坦理论中一个致命的缺陷。如果黑洞具有熵，就应该具有温度。如果具有温度，就应该发出辐射。可是如果任何东西都不能从黑洞逃脱，黑洞又怎么能发出辐射？我必须承认，我写这篇文章的部分动机是不高兴伯肯斯坦滥用了我的事件视界面积增加的发现。最后的结果证明基本上他是正确的，虽然是以他绝未预料到的方式。

邓尼斯·西阿玛

对于和热力学之间的这些相似，霍金起初只觉得好奇。而伯肯斯坦断言，它们是真正的热力学性质。因为史蒂芬·霍金和詹姆·巴丁以及布兰登·卡特在1973年写了一篇非常重要的文章，他们把这篇文章直截了当地叫做《黑洞力学的四个定律》，而不叫着《黑洞热力学的四个定律》，所以你可以跟随他的思想演化。他们探讨这些相似性，但是强调这不是真正的热力学，而且他们有很充分的理由这么说。因为那个时候人们认为，一个热的黑洞仍然不能辐射；而如果一个热体不能辐射，你的热力

学就失效，所以这些类比并无深意。

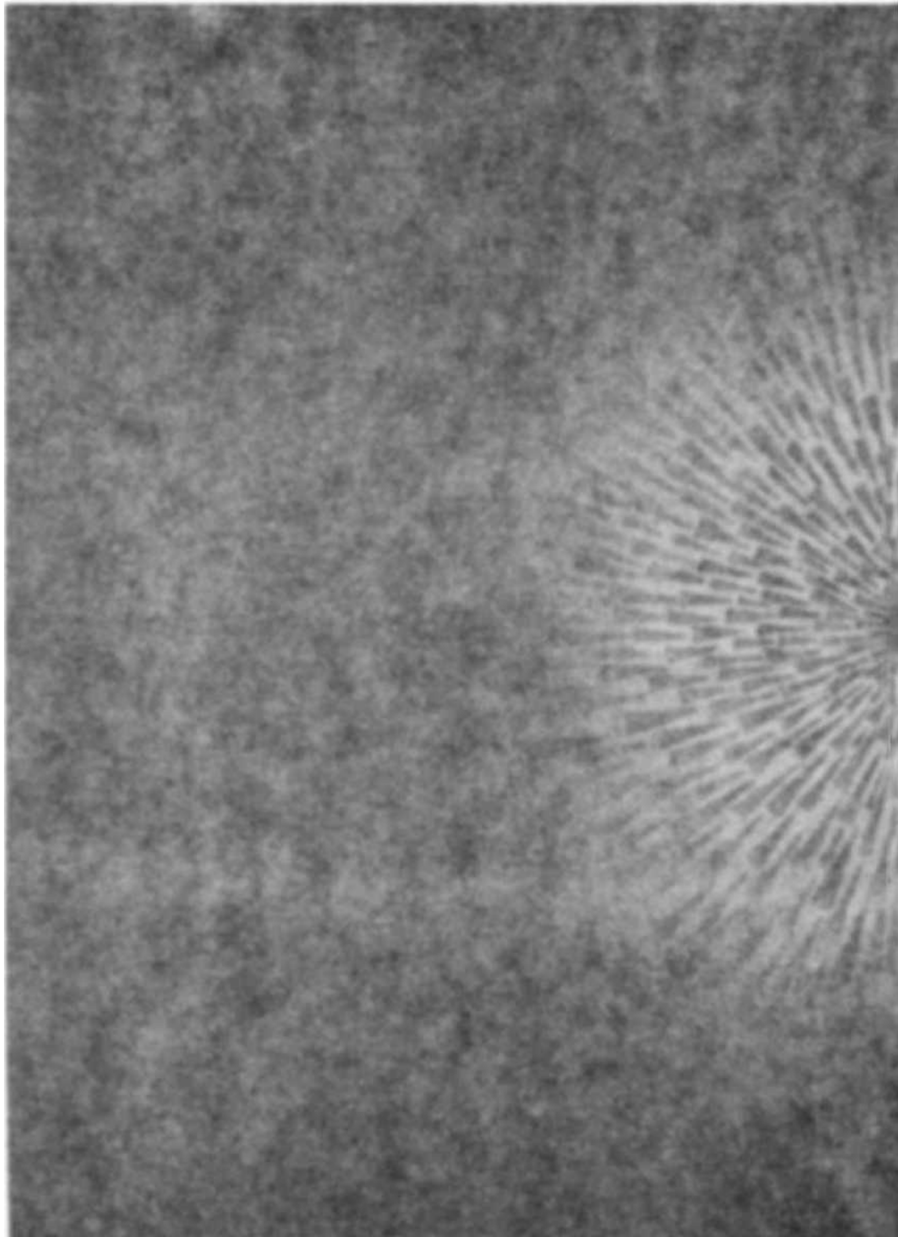
那是1973年的事。然后，在1973年和1974年之间，霍金在研究当一颗恒星坍缩之际，把量子力学效应引进它的外围区域时会发生什么事。他利用复杂的计算发现了：坍缩恒星变化的引力场会存在辐射。他的计算是如此复杂和繁复，对我来说简直是奇迹！

因为在量子力学中，当一个场改变时就会产生并辐射出粒子，所以也许任何人都会预料到上述结果。这个计算中令人始料未及的是，在坍缩的最后阶段，当恒星接近成为黑洞的条件时——也就是当它变成如此紧密，以至于在经典意义上辐射不能再离开黑洞——存在着残余的辐射，而这残余辐射具有黑洞温度表征的热谱。这温度正是伯肯斯坦原先引进的。这是关键性发现。

我记得1974年访剑桥时，遇到了马丁·雷斯，他激动得颤抖。[4]

他说：“你听说史蒂芬的发现了吗？一切都不同了，一切都改变了！”

“你说什么？”我问道。雷斯向我解释说，由于量子力学效应，黑洞像热体一样辐射，所以不是黑的。这就引进了热力学、广义相对论和量子力学的新统一，这会改变我们对物理的理解。



恒星坍缩的图解。一颗烧光自身大部分燃料的恒星最终将凝聚成直径只有几英里的球

后来由我协助召开的在牛津附近卢瑟福实验室的一次会议，史蒂芬来参加了。大家都很激动，我记得有人站起来说：“史蒂芬你一定弄错了，我一点也不相信！”

约翰·泰勒[5]

我曾说过，我并不满意用负能量粒子产生来解释。不过我觉得这是科学争论的一部分。你必须妥协。我为自己能参与其中而感到高兴。这才是其中的乐趣。你知道，如果所有人都坐下来附和说“啊，真不错”，而在大家头脑中仍有悬疑的问题，那就不是对科学负责的态度。但是除了那一次向他质疑之外，我并非反对派。

史蒂芬·霍金

我仍然不能完全相信它。直到我找到了黑洞能够发生辐射的机制后，才使自己信服。根据量子力学，空间充满了虚的粒子和反粒子，它们经常成对产生、分开，然后聚到一起并相互湮灭。黑洞存在时，一对虚粒子中的一个会掉到黑洞中去，而另一个由于失去与之湮灭的伙伴而留存下来。被遗弃的粒子就是黑洞发射的辐射。量子力学允许粒子逃离黑洞，这是爱因斯坦的广义相对论不能允许的事情。[6]

由于量子力学中的概率和不确定性，爱因斯坦从未接受过它。他说道：“上帝不玩骰子。”看来爱因斯坦犯了双重错误。黑洞的量子效应暗示，不仅上帝玩骰子，而且有时候把骰子丢到看不见的地方去。

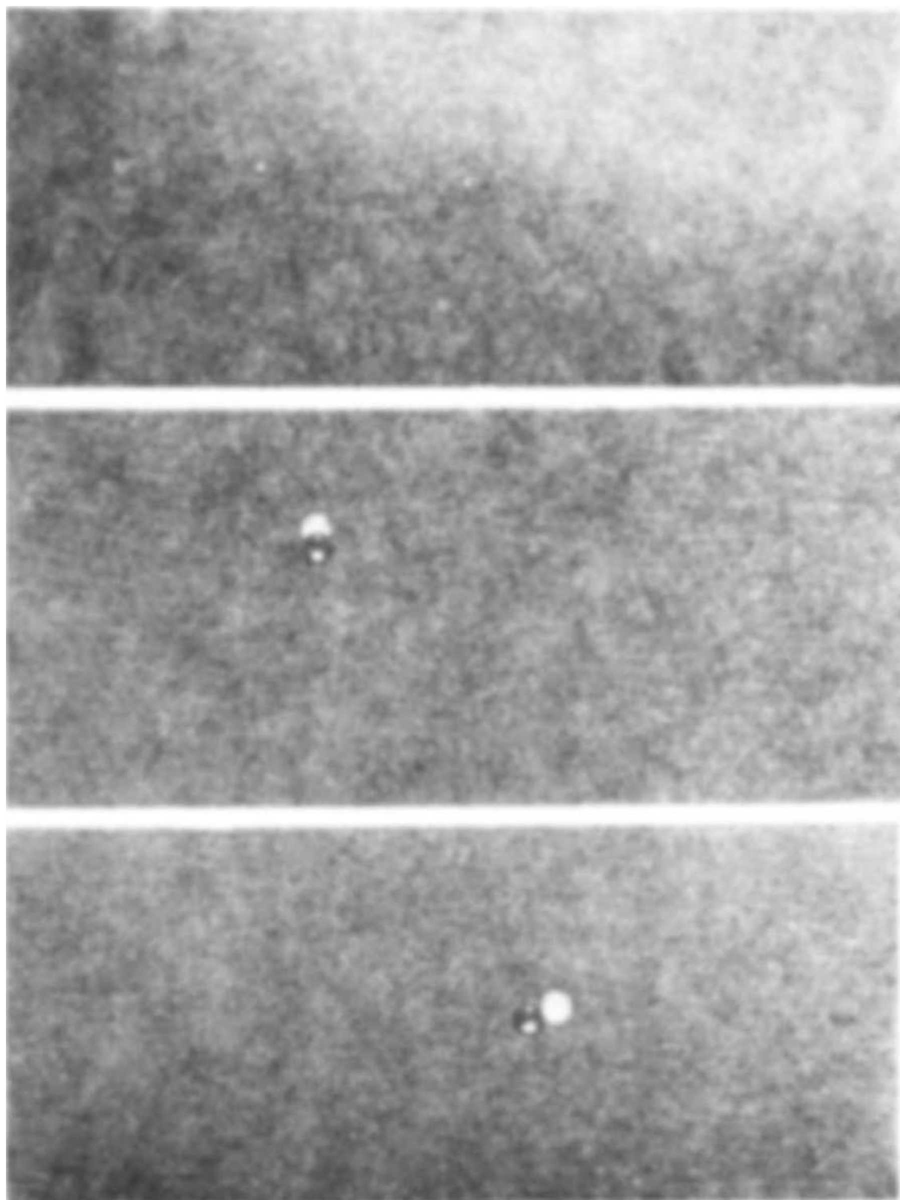
邓尼斯·西阿玛

雅可夫·捷尔多维奇，这位苏联著名的天体物理学家和宇宙学家也拒绝相信它。可是花了几个月的时间，人们就清楚了，这种论证是正确的。这个发现除了出乎预料的性质之外，它的原始计算是相当复杂的，其效应是由正在发生的更大现象产生的小的残余效应。正如在物理学中经常发生的，一旦人们得到这种观念，他们就澄清讨论，使之更为清晰。几个月后所有人都相信它是正确的，它彻底改变了我们对物理学的理解。

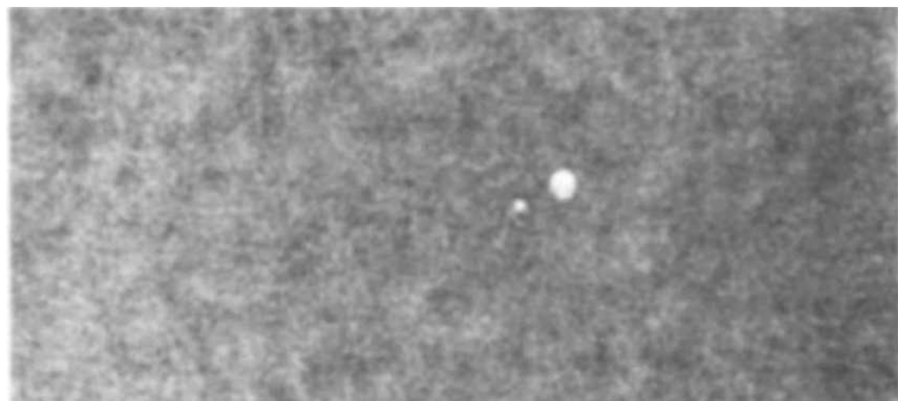
霍金效应描述的黑洞辐射还未被观测到，但这并非霍金的过错。这是因为对于自然产生的黑洞，如可能在天鹅座X—1[7]中的那一个，这个效应太弱以至于观测不到。

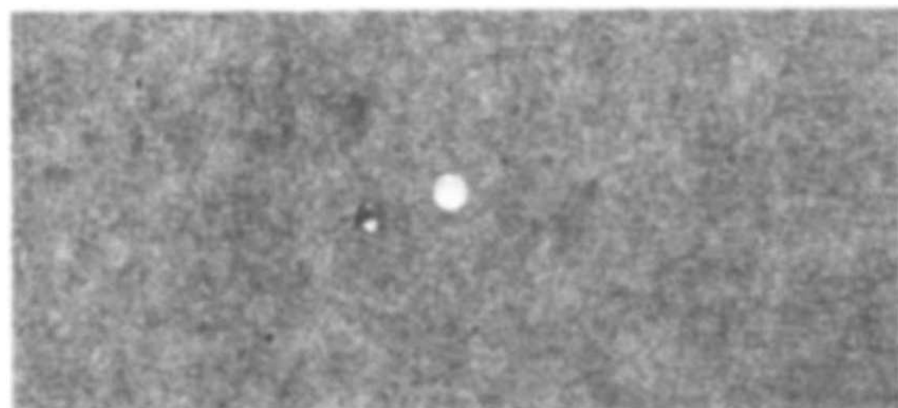
他曾经努力寻找观测效应，因为他在一系列有趣的工作中提议，也许存在低质量的太初黑洞。[8]

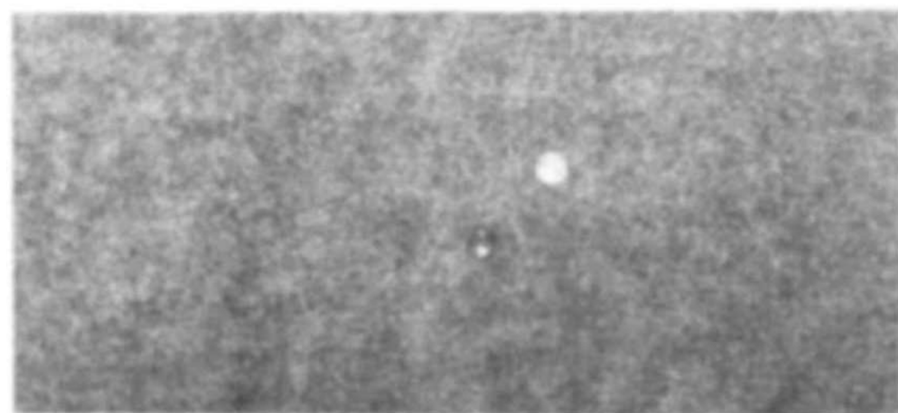
你瞧，黑洞的质量越小，它的温度就越高。当然，黑洞越热，则它释出的辐射功率就越大。而且，随着发出辐射并且发生质量损失，它变得更热，辐射得更快。这样，最终的结局是一次剧烈的爆炸。事实上，霍金计算出，除了宇宙本身的大爆炸起源以外，这爆炸比科学中任何已知爆炸都更激烈。

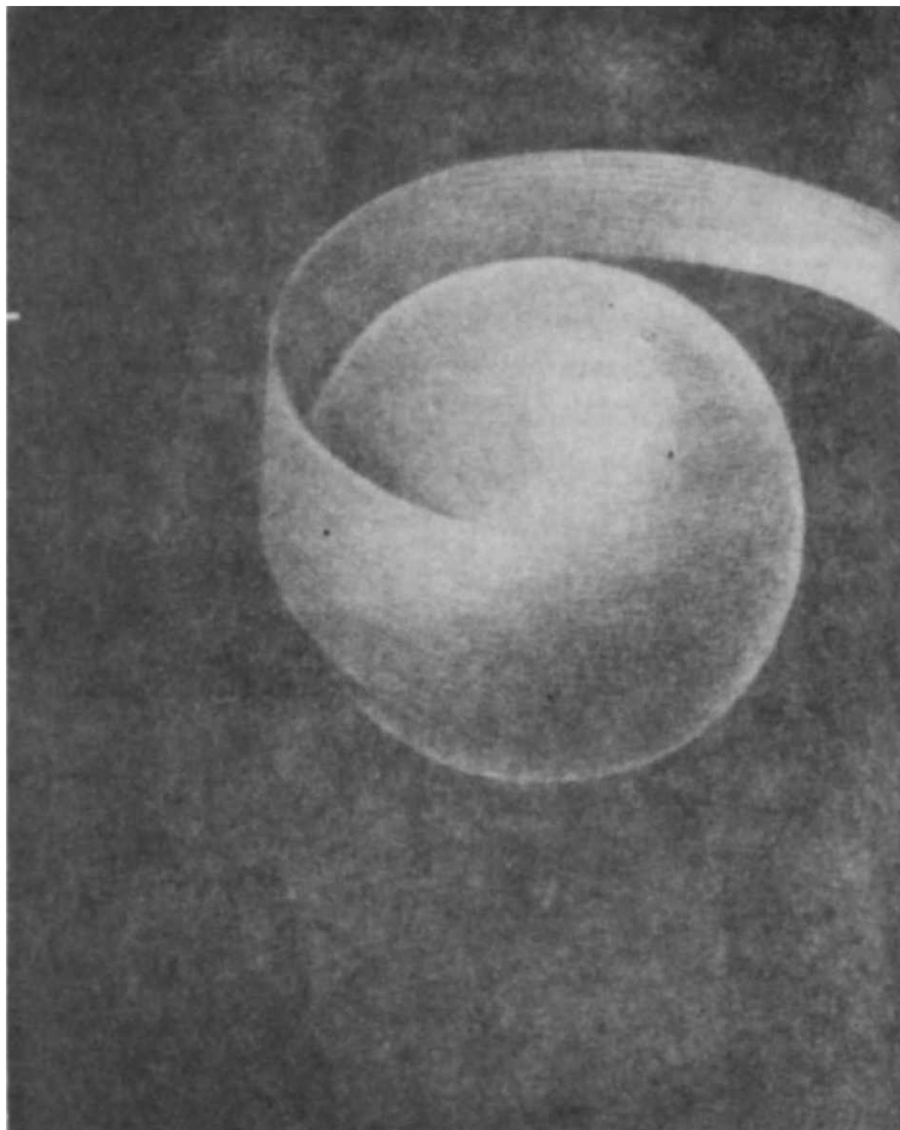


霍金辐射。空间中充满了粒子和反粒子对，黑洞存在时，一个粒子可以掉到里面去，留下它未配对的伴侣，后者以从该黑洞发射出的辐射形式而存在









天鹅座X—1中黑洞辐射的图示。天鹅座X—1被认为由互相环绕的一个黑洞和一个正常恒星组成。当物质从那个可见星的表面喷出时，它以涡旋的运动落到它那看不见的伴星上去。这些物质变得非常热并发射X射线

整个问题在于：这个过程需要多长时间？如果有一个太阳质量的黑洞，而且你认为它现在开始辐射，则它需要花费比现在宇宙年龄长大约10##60###倍才会这么剧烈地爆炸，这个时间真是长得不可思议。可是，如果你有一个质量大约为一座小山那么大的黑洞，它就会在大约宇宙年龄的时间里爆炸。

因此霍金说，具有这种质量且在早期宇宙形成的太初黑洞，也许现

在正在爆发，我们可以在伽马射线以及射电波中寻找这些爆炸。由于称作伽马射线暴的起因还不清楚，所以人们有一阵子十分激动地认真寻求从爆发黑洞出来的伽马射线。可是，现在我们已经完全知道，它们并不是史蒂芬的黑洞爆炸。

当然，你没看到它们的事实并不意味着这思想是错的。它可能表明并没有形成许多这么低质量的黑洞。不管怎么说，这些效应太弱了，以致无法直接在实验室里观察到，正因为这个原因未被检测到。

白纳德·卡尔

约翰·惠勒有一次说过，谈论史蒂芬理论犹如在舌头上含一块糖。物理学中的许多突破的确如此。它们和流行观念对抗，但是一旦你拥有它们，它们的四周就有了真理的光环。

基普·索恩

霍金辐射发现的前奏是霍金和捷尔多维奇之间的一次会面，当时我也在场。1973年史蒂芬和简决定访问苏联。由于我对莫斯科十分熟悉，他们邀我和他们同行。这样子我就去了。我从1968年起就和苏联科学家合作研究，经常有来往。

捷尔多维奇是史蒂芬想见的关键人物，反之亦然。在苏联，捷尔多维奇和安德雷·萨哈洛夫得到过的勋章数量仅次于勃列日涅夫，而勃列日涅夫的勋章有点滑稽可笑。捷尔多维奇和萨哈洛夫是苏联氢弹的关键设计者。20世纪60年代初，他们两人都离开了核武器的研制，并开始研究宇宙学、黑洞以及相关的领域。

捷尔多维奇在1969年左右意识到旋转的黑洞应该发出辐射，而这种辐射应是广义相对论和量子理论的结合或半结合的产物。可是捷尔多维奇相信，这个旋转黑洞所发出的辐射会使黑洞旋转变慢，然后辐射会停止。这样，辐射基本上是由黑洞的旋转能量产生的，辐射来自靠近视界外的区域，而发射辐射会使黑洞停止旋转。

1969年捷尔多维奇告诉我，他相信这会发生，但是他的广义相对论的基础不足，证明不了它。他仅仅凭直觉知道这一点。我认为他发疯

了，所以我们打赌，他打赌说仔细计算最终将证明这是事实，而我赌这不会发生。

1973年当我和史蒂芬回去时，已经很清楚旋转黑洞必须发射这种辐射，所以输了一瓶白马牌苏格兰酒给他。

但是史蒂芬不知道这个思想。当他得知捷尔多维奇的思想时，捷尔多维奇的解释并不使他完全信服。他要用自己的方式来思考。

史蒂芬回到剑桥后思考了几个月。他意识到，甚至非旋转黑洞也会发射辐射，因此黑洞会蒸发，这比捷尔多维奇的能把黑洞的旋转能量发射出来的结论远为前卫。

捷尔多维奇死于1988年。他真是个了不起的人物。直至戈尔巴乔夫时代，他才得以到西方旅行，不仅因为他是犹太人，还因为他深深地卷入到氢弹的研制。他不理解广义相对论，然而他凭直觉知道旋转黑洞会蒸发。

可是他的直觉并没有告诉他一个非旋转的黑洞会蒸发。事实上，捷尔多维奇是在这个问题上最晚让步的人。两年之后，史蒂芬在数学上指出，一个非旋转的黑洞必须完全蒸发光。那时，我刚好在莫斯科，而且发现没有一个苏联人相信。他们为什么不相信呢？因为捷尔多维奇不相信。

后来我在各研究所做了一系列演讲，描述史蒂芬的原始计算以及他和詹姆·哈特尔合作的不同方式的计算。这些演讲迫使捷尔多维奇和他优秀的年轻学生——亚历山大·斯塔拉宾斯基回去以他们自己的方法重新思考。

即将离开莫斯科前的星期天晚上，捷尔多维奇打电话给我。他说："到我的寓所来，我有话跟你说。"

我正急切地要完成和某人的合作文章，但只要捷尔多维奇呼唤，我就会毫不犹豫地去。我拦下路过的摩托车，赶到了捷尔多维奇的寓所。莫斯科没有出租车，所以必须挥手招呼摩托车。我进去敲门，发现捷尔多维奇和斯塔拉宾斯基在那里。他们伸出手来说："我们输了。霍金是对的，我们错了。"

史蒂芬·霍金

黑洞辐射向我们显示，引力坍缩不是我们曾经一度以为的那样，是最后的阶段。如果一位太空人掉到一个黑洞中去，他将会以辐射的形式回到宇宙的其他部分去。从这观点来看，该太空人在某种意义上被再循环了。

然而，当任何人在黑洞中被撕碎时，他的个人时间概念达到了终端，所以这种不朽实在是非常可怜的。

基普·索恩

到1975年止，我为物理学打过许多次赌，除了和捷尔多维奇那一次，每次都赢。我和史蒂芬打了一个赌，它是关于在天鹅座X—1中是否存在一个黑洞。大约在那个时期，为了建立解释天鹅座X—1的详细模型，我做了一些工作，所以我打赌的动机是，如果在天鹅座X—1中果真有一个黑洞的话，则那个模型就不会完全无用。

史蒂芬·霍金

我和基普·索恩打赌说，在天鹅座X—1中没有黑洞，这对我来说像是买保险。我为研究黑洞做了大量工作，如果黑洞不存在，我花的工夫就都白费了。所以，如果黑洞存在，基帕就会得到一年的《阁楼》。

Whereas Stephen Hawking has such a large investment in General Relativity and Black Holes and desires an insurance policy, and whereas Kip Thorne likes to live dangerously without an insurance policy,

Therefore be it resolved that Stephen Hawking bets 1 year's subscription to "Penthouse" as against Kip Thorne's wager of a 4 year subscription to "Private Eye", that Cygnus X1 does not contain a black hole of mass above the Chandrasekhar limit.

Conceded Stephen Hawking

史蒂芬·霍金和基普·索恩之间关于天鹅座X—1黑洞的赌状

如果不存在，我将得到四年的《私人眼睛》作为安慰奖品。

基普·索恩

史蒂芬的手逐渐地不听使唤，他必须开始发展他的几何论证，这样他就可以在他的头脑中以图形来进行这些论证。他发展了一系列非常强

有力、任何人都没有的工具。所以，在某种意义上，当你失去一套工具时，你可以发展其他工具。而新的工具比旧的工具对不同的问题更为适用。而如果你是世界上唯一拥有这些工具的大师，那就表示某类问题只能由你解决，而任何人不容置喙。

伊莎贝尔·霍金

他自己说过，如果他没得病，就不会达到目前的成就。正如萨缪尔·约翰逊说过的，你得知会在夜尽天明时被吊死，将使你思想极为专注。若在另外的情形下，我认为如果他不生病，可能不会如此专心研究，因为他总是对生活中许多事有极大兴趣。我不知道如果他能到处走动的话，他是否会以同样的精神献身研究。当然我不能说得这类病是一种运气。但是就他而言，可比其他人少一些不幸，因为他可如此全心全意活在他的头脑中。

史蒂芬·霍金

直到1974年，我还能自己吃饭和上下床。简在没有外界协助的情形下帮助我，并且带大了两个孩子。然而事情变得越来越困难。所以，此后我的一名研究生就和我们同住。

当·佩奇

我通常在7点15分或7点半左右起床，冲一下澡，接着读圣经、祷告。然后在8点15分，我下去帮助史蒂芬起床。我经常在吃早饭时告诉他在圣经里读到的内容，希望这最后总有一些影响。

我记得告诉过他一个故事。故事是说，耶稣遇到了一个疯子，这个人被一群魔鬼附身。这群魔鬼要耶稣把他们转附身到一群猪身上。这群疯猪跑到悬崖边缘跳到海中。史蒂芬提高了嗓门说：“哦，保护动物协会不会欣赏这故事，是不是！”

另一个故事是耶稣谈论末日，他说末日来临的时候，有两个人在田里干活，上帝会让一个人上天而另一个留下；还有两个人在床上，一个人上天而另一人留下。史蒂芬在早餐时说：“两个人在吃早餐，一个人上

天，而另一个人留下。”他理解故事的要点，并且友善地接受。

早饭后，我们开始工作。通常先看看是否有人寄来科学论文。这是一些尚未在科学杂志发表前请人看的论文。因为史蒂芬不能翻动书页，所以我得替他拿着，放在他面前，这也使我有机会阅读它们。

我发现，尽管霍金具有伟大的头脑，他却读得相当慢。我可以用大约他两倍的速度阅读。其原因当然是，让他回头来再找是非常困难的，所以他必须过目不忘。而我只需要快速浏览，如果我有兴趣，并且想再深入研究，可以再回过头来重读。



当·佩奇1976年在基普·索恩指导下在加州理工学院获得物理学和天文学的博士学位。当史蒂芬·霍金在那里做一年访问学者时，他遇到了史蒂芬。当·佩奇是一名福音基督徒；他相信，理解这个宇宙可以揭示上帝的某些方面，但是上帝拥有比这个宇宙更多的东西。从1976年到1979年，当他在剑桥从事博士后研究时，和霍金一家住在一起。现任爱德蒙顿的阿尔贝塔大学的物理教授

基普·索恩

有一次我到史蒂芬和简家做客。晚饭后，在史蒂芬要上床的时候，他自己一个人上楼。我忘记了这是一段还是两段的楼梯。这时史蒂芬已不能走路。他上楼梯的办法是抓住支持栏杆的铁柱把手，并用手臂力量把自己拉上去。要把自己从底层拖到二层需要费时又艰苦地奋斗。

简解释说，这是他复健的重要一环，以尽可能长久地保持他肌肉运动的协调和力量。



当·佩奇和史蒂芬·霍金在工作

在我明白这缘由之前，看到他受这等煎熬，真是令人心碎。正如对史蒂芬其他的类似事情，一旦你了解他，你就会将那些事视作当然。然而，当你初见到这种情景时，一定会大吃一惊，会用非常感动的眼光看他。这只是日常生活的一部分——他用这种方法把自己拖到楼上去。

伊莎贝尔·霍金

我最讨厌的一种事是任何时候身边都有人。我忍受不了那些。然而他发现事情很有趣，他享受人生，他到处横冲直撞。我认为这是难能可贵的。我和他父亲都缺乏这种勇气。我们只能赞赏，而且想不透他怎么

得到这种勇气。



在剑桥的街道上，“他到处横冲直撞”

当·佩奇

有一年，霍金一家带我一道去位于威尔斯郡威耶河附近的乡间别墅。这个房子在山上，有一段铺好的人行道通到房子去。我当然希望尽量少走几趟，所以就把备用的电池放在他的轮椅下。可是史蒂芬没有意识到这一点，他不知道他的轮椅的负载已经达到了极限。

他开始上坡并超前我不少——10米左右吧！然后他拐个弯进入房子，但是这刚好在斜坡上。我注意到史蒂芬的轮椅慢慢地往后倾倒下去。我想跑上去扶住，但是没有来得及，他往后翻倒到灌木中去了。

看到这位引力大师被地球微弱的引力所征服，是令人震惊的一幕。

基普·索恩

早在20世纪70年代中期，有一两次，史蒂芬和我讨论他将来的命运。那时他似乎有非常清晰的图像。他说，他预料最终会因为得肺炎而

死，虽不知何时发生，可是一定会发生。他还预料，在此之前他的智力不会有任何退化，他对此信心百倍，他对自己的最终命运似乎泰然处之。

第4章

1975年，梵蒂冈把授予“有杰出成就的年轻科学家”的庇佑斯十二世奖章颁发给史蒂芬·霍金。他和白纳德·卡尔一同飞往罗马，在梵蒂冈接受教宗保罗六世颁奖。

白纳德·卡尔

那是一个非常感人的场合。在正常情形下，得奖的人必须走到教宗面前去接受奖章。可是，因为史蒂芬不能上前，所以教宗一直走到史蒂芬面前来。

这是一个历史时刻。教会——尤其是天主教会，和宇宙学史之间一向有冲突，这可一直回溯到伽利略时代。史蒂芬对伽利略有极大的亲切感。我记得，我们去梵蒂冈时，他非常渴望到档案馆去查阅被认为是伽利略悔过的文件。在这文件中，伽利略在教会的压力下收回了地球围绕太阳旋转的理论。

科学和教会之间的争论仍然方兴未艾。最后，教会宣布他们犯了错误，事实上伽利略是对的。这使我们感到欣慰。但是我很怀疑，如果教宗真的理解史蒂芬的发现，他是否会认可。



1986年霍金被选为教廷科学院院士之际，教宗约翰·保罗二世和简提蒙以及史蒂芬在梵蒂冈

基普·索恩

我看得十分清楚，从20世纪70年代早期开始，史蒂芬的研究方式发生了显著的改变。这种改变，可用他在1980年左右对我说的话来代表：“我宁愿是正确的，而不是严密的。”严密性质是数学家追求的，他们认为正确性需要坚定清晰的数学证明。20世纪60年代和70年代早期，史蒂芬在研究中追求过这种严密性，他试图使每一部分都完全坚定稳固。

近年来，他在寻求真理时变得更富猜测性。譬如说达到了95%的正确性，他就会继续很快地前进。他放弃了似乎在20世纪70年代早期对确定性的追求，而喜欢或然性，从而快速地朝理解宇宙性质的终极目标前进。

史蒂芬·霍金

1981年在梵蒂冈召开宇宙学会议时，我又重新产生了对宇宙开端和命运问题的兴趣。之后我们受到教皇的召见，他刚从那次谋杀中恢复过来。他告诉我们，研究宇宙在大爆炸后的演化是可以的，但是由于大爆

炸本身是创生的时刻，因而是上帝的事务，所以我们不应该去询问那个时刻本身。我高兴的是，那时候他不知道，我在会议上刚发表的论题是空间—时间为有限的但是没有边界的可能性，这表明它没有开端，也就是创生的时刻。

因为这篇论文具有相当的技术性，并且采用了一个令人敬畏的题目《宇宙的边界条件》，所以关于宇宙起始的含义不是一下子就那么一目了然。我在该论文中提出：空间和时间在范围上有限，但是自己包容起来，而没有边界或边缘，正如地球的表面面积是有限的但却没有边界或边缘一样。在我所有的旅行中，我从未从世界的边缘掉下去。

在梵蒂冈会议期间，我不知道如何利用这个思想对宇宙行为作预言。但是在1982年和1983年间，我和我的朋友兼同事加州大学圣他巴巴拉分校的詹姆·哈特尔合作。我们指出如何利用这个无边界思想，在量子引力论中计算出宇宙的态。

如果无边界设想是正确的，则不存在奇性，而科学定律就在包括宇宙开端的任何地方都成立。宇宙开始的方式就由科学定律所决定。我成功地实现了发现宇宙如何开始的抱负，但是我仍然不知道它为什么要起始。

詹姆·哈特尔

在量子力学中，我们是用一个系统的波函数来描述它。因此，我们能计算看到的东西的概率。例如，在宇宙的情形下，我们也许对它的大小、形状以及它能显示出空间的三维几何感兴趣。波函数允许我们计算其他不同答案的概率，所以我们也研究其他可能的模式。可是，我们的宇宙不是这样，我们生活在固定的一个量子态中，因此产生了一个有趣的问题：根据什么原则，从许多可能的宇宙态中特别选出一种态，使我们得到一种机制，用以预测或者连接现有宇宙的不同特征？



詹姆·哈特尔是史蒂芬·霍金的哈特尔—霍金设想的合作者。他现为加州大学圣他巴巴拉分校的物理教授，他的研究方向主要是相对论和引力

邓尼斯·西阿玛

史蒂芬的“量子宇宙论”，或者更通俗点讲“宇宙的波函数”是一个新的物理设想。它是说，使用量子力学计算宇宙的行为，要牵涉到高度技巧性的步骤，这些步骤代表了物理作用方式的新假设，因此它们是有争议的，是还没有被确立起来的。

可是，他想指出的是，如果用他建议的步骤计算出宇宙的波函数，那么就能算出宇宙会像什么样子。这是一种非常聪明和卓越的建议，但是并没有公认一定会成功。他和他的学生以及世界上其他地方的人，都在看真实的宇宙是否具有和他设想的理论含义相同的性质，以此来检验这个新理论。他的观点是：这会导致一系列成功的思想。但是，目前这

一切还都处于争议的阶段。

在经典物理中，人们可以给定所有粒子在同一个时刻的位置和速度，从而描述一个系统的状态。另一方面，在量子物理中，粒子不具有精确定义的位置和速度，相反的，人们所能提供最完整的描述只是所谓的波函数。这可以认为是提供在不同位置上找到该粒子的概率。人们不必再指明该粒子的速度。这些在不确定性规定的程度上由波函数决定。

在量子理论中，宇宙的态可由所谓的宇宙波函数来描述。它提供了现在空间为以不同方式弯曲的或者翘曲的概率。空间几乎为平坦的概率最大，但是哈特尔和霍金的无边界设想预言，在空间几何中的小波浪的概率相当大。这些对应于引力波，现在人们正用非常精密的测量手段去检测它们。

基普·索恩

描述量子引力——也就是广义相对论和量子理论的结合，有许多方法。我发现最富有魅力的，是哈特尔和霍金在描述把量子力学和引力结合在一起时所采用的方法，我觉得这很合我意。当你在科学（譬如物理学）的最前沿探索时，必须大大地仰仗你自己的体会和感觉。你必须决定你的研究方向，或者为学生指出哪个方向较有可为。这一类指导必须来自于直觉，来自于天性。正如苏联同事所说的，来自于心肝。我打从我的心肝里感到它们是对的。

安东尼·赫维许

我想，过去20年来最奇妙的事情是：我们现在能论证在时间开端后的一百万分之一秒前发生的事。宇宙具有奇性的起始是一个令人惊异的观念。但是，能够有意义地谈论及争议那么早宇宙的物理，对我而言无疑是一场革命。尤其回顾我自己的一生，想到过去我们甚至不知道宇宙是演化的或是稳态的，真是感慨不已。

这还引起了令人敬畏的哲学问题，比如时间有无开端以及这个问题的真正含义。要使物理学家真正掌握这些问题是困难的。

约翰·惠勒

许多人在许多场合多次提出有关宇宙起源的问题：它是如何起始的？

当爱因斯坦第一次探索自己的理论，发现理论断言宇宙不能永远维持尺度不变时，他不信任它的预言。为什么他如此不相信呢？因为他心目中的伟大英雄斯宾诺莎在很久以前反驳了圣经中的太初创世的思想。斯宾诺莎说过：“在不存在任何可以告知钟表何时起始之前的东西，钟表存在何方？”这听起来很矛盾。

当然，当最后发现宇宙在膨胀时，爱因斯坦告诉我那伟大的朋友乔治·伽莫夫：“这是我研究生涯中的最大错误。”

从此以后，他和我都把宇宙膨胀的预言当作强而有力的证据，认为是某种和人类以前理解的一切截然不同的东西，是人类被赋予探索空间和宇宙运行方式的能力的最强有力的证据，以及我们有朝一日能解开这些秘密的最伟大象征。可是，我认为按照量子力学，我们对诸如宇宙如何开端之类的问题会有更深刻的洞察，因为我们在那里意识到了时间的概念本身是一种理想化。“时间”这个词不是上帝从天上赐予我们的礼物；时间的观念是人们发明的一个词。如果它牵涉着一些困惑，应是谁的过错？那是我们发明使用这个词的过错。

有一次，我在得克萨斯州奥斯汀市一个咖啡馆的男厕所看到了一行涂鸦：“时间是大自然避免使所有事情同时发生的方法”，这是我们通常解释时间的简要说法。但是，我们用量子力学观点越深入地探究时间，就得到越多洞察，时间本身也就越显得微妙，在彻底理解这全部图像的过程中，需要解决的困惑就越繁重。

所以，任何询问宇宙如何开始的人都应反躬自问：“你从何处得到时间观念的？”

> 在量子力学中，电子的位置是不确定的。这种不确定性在正常情形下是可以忽略的，但是它在原子距离尺度下变得很重要，以至于诸如“原子在何处”的问题没有什么有意义的答案。类似的，在量子引力中也存在空间—时间几何的不确定性。这种不确定性在正常情形下也是可以忽略的，可是它在非常微小的距离尺度和时间间隔

下变得很重要，以至于诸如“现在什么时候”的问题没有什么意义。尤其是，这意味着时间概念在非常接近大爆炸时变得没有意义。

史蒂芬·霍金提出，使用虚时间也许能取得一些进展。虚时间和实时间的关系，犹如虚数和实数的关系。虚时间物理是物理学的爱丽丝奇境；例如，粒子可以运动得比光还快，甚至可在（虚）时间中向后运动。当然，当描述变成对量子力学的一种近似时，每件事都是对的，没有人可比光运动得更快或者在（实）时间中向后运动。

詹姆·哈特尔和史蒂芬·霍金提出一种方法，把虚时间技巧用到量子宇宙论中，并用它来分析极端简化了的宇宙模型。虽然该模型比实在宇宙大为简化，当它用经典广义相对论处理时，具有大爆炸奇性，但是它的量子力学形式却根本没有奇性。哈特尔和霍金成功地用所谓历史前的时间来取代奇性。

哈特尔—霍金思想是否能成功地应用于实在宇宙，仍是一个未解决的问题。

克里斯多福·伊宣蒙

从“无”中创生的观念当然是非常激动人心的，这是使人极感兴趣的东西。哈特尔、霍金的从“无”创生的图像，实际上是以非技术性术语非常形象化地描述数学。你瞧，物理学中正常发生的东西是，在具有传统的因果性和决定性观念的地方，如果给你某个特殊时刻的态，你唯一能算出后来某个时刻的态。这就是人们所说的因果性。按照这个观点，你永远不能从“无”中创生，事实上你根本不可能有创生。你真正拥有的一切是变化：因果性变化，可是这变化属于已经存在那里的东西。这种变化也许牵涉到创生，例如你在CERN [9]的粒子加速器看到基本粒子相碰撞而出现一堆新粒子，那看起来像创生，但是你其实只是把能量从一种形式转变成另一种形式，而这整个系统纯粹是因果性和决定性的，每一件东西都只是以通常的方式流动，你肯定不是从“无”中生“有”。



克里斯多福·伊宣蒙是伦敦帝国学院的理论物理教授，他研究广义相对论和量子物理之间的关系

在广义相对论中，时间和空间在公式中表达的方式使实际谈论时间的创生成为可能。麻烦的是，在经典理论中，当空间和时间“开始形成”时，实在的点本身是数学中的奇点，数学失效了，所以它不能给你一个创生论。你在传统的宇宙论中所能说的是，存在许多不同的可能宇宙，它们都和爱因斯坦方程式相符合。我们恰巧在这个宇宙中生活的事实，毋宁说纯粹是出于偶然。你不能赋予任何理由——甚至在原则上也不能。你所能说的一切是条件陈述：假定宇宙在这一时刻处在这个状态，则它在以后的时刻将处于那个状态。它是条件性类型的演化。

然而，当你谈到虚时间，就有一个奇怪的可能性，也就是“现在”不一定要有一连串的过去时刻。如果我们从现在这一时刻往过去回溯，在很长的时间内一切都完全正常地进行，甚至在虚时间中也是如此。只要你使用这个唯象的时间，看起来就像你在通常时间里回溯过去。

但是随着你往以前退去，越来越接近传统的实时间图像中变成原点

之处，你就发现时间的性质在改变，复的或虚的变得越来越有分量。最后，在经典理论中应该是奇点的东西被抹平了，你就得到这张漂亮的图画，这些碗状的宇宙创生图像。那里没有起点，只是某种光滑的形状。

哈特尔和霍金所发现的是，如果你假设宇宙在虚时间里的过去历史图像是所有可能的、恰好和我们现在时刻宇宙相符的这类形状，而你多多少少用传统量子力学方式来解释之，至少在原则上你会得到整个宇宙唯一的波函数。

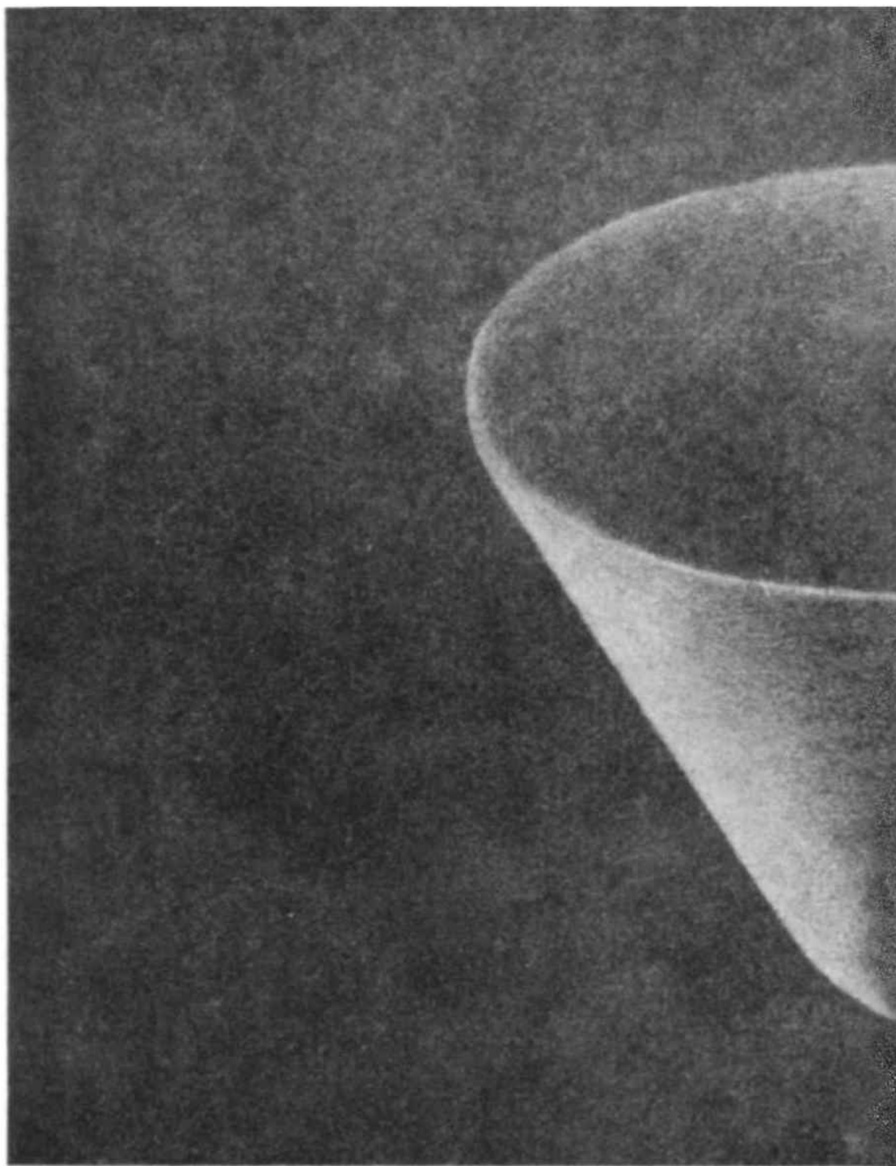
这样，你就得到了这个没有过去的美妙图画，宇宙根本不从任何东西产生出来。因为它是一个自洽的数学结构，所有你真正能说的是宇宙存在。和从某点创生宇宙的图景不一样，这宇宙没有过去，因为没有任何它在其中创生的东西。

如此，宇宙从“无”中创生的说法，实际上有一点用词不当，这是词汇“无”的误用。它不只是指在空虚的空间中出现宇宙，你也许可以把这空间称为“无”，因为甚至连创生事件也不存在，所以根本不存在任何东西！

在这些理论中，动词过去时态的使用变得不恰当。当然，在人们相信实时间时就建立了时态。不幸的是，我们还没有在虚时间中表示时态的语言形式。因此，在这层意义上，说“从无中创生”肯定是误导的。它对于这个在预先存在的时间中忽然出现的宇宙图像很合适，可是它并不是哈特尔—霍金态的贴切描述。

史蒂芬·霍金

为了预言宇宙是如何起始的，人们需要在时间开端处也能成立的定律。在实时间内只存在两种可能性：或者时间往过去回溯直至无穷，或者时间在一个奇点处有一个开端。人们可以把实时间认为是从大爆炸起到大挤压止的一根直线。但是，人们还可以考虑和实时间成直角的另一个时间方向。这叫做时间的虚方向。在时间的虚方向，不必要任何形成宇宙开端或终结的奇点。



开放宇宙：“随着你往后退去，时间的性质随着改变……直到你得到这些碗状的宇宙创生图像，那里没有起点，只是某种光滑的形状。”

在虚时间里，没有科学定律在该处失效的奇点，也没有人们需要在该处乞求上帝的宇宙边缘。宇宙既不创生，也不毁灭结束。它就是存在。

也许虚时间才真正是真实的时间，而我们称为实时间的仅是我们的想象。宇宙在实时间里各有一个开端和终结。可是在虚时间里，不存在奇点或边界。因此，也许我们称为的虚时间是真正更基本的，而我们叫

做实时间的，只不过是我们发明的观念，用来帮助自己描述我们认为的宇宙的样子。

基普·索恩

宇宙如何终结存在两种基本理论。一种是开放宇宙的观念，它会继续演化，不会突然终止；事情仅仅是缓慢下来，并且按照热力学第二定律到达热死。另外一种是闭合宇宙的观念，它会停止膨胀，而且会向自身坍缩回来，这有时被称作大挤压，像是大爆炸，只不过在时间上颠倒过来就是了。

詹姆·哈特尔

虚时间中的词“虚”不是指想象，它是指数学中非常古老的观念，也就是虚数，譬如-1的平方根，理解这一点非常重要。对于一位给定的观察者，空间和时间当然是可区分的：我们用尺来测量空间，用钟表测量时间。爱因斯坦和赫尔曼·闵可夫斯基在20世纪初指出，不同的观察者的空间和时间概念，只不过是同一个统一的空间—时间观念的不同方面。空间—时间是四维空间几何，它有某些类空间的方向和某些类时间的方向。所以就一定意义上来讲，在那里空间和时间概念仍是可以区分的。

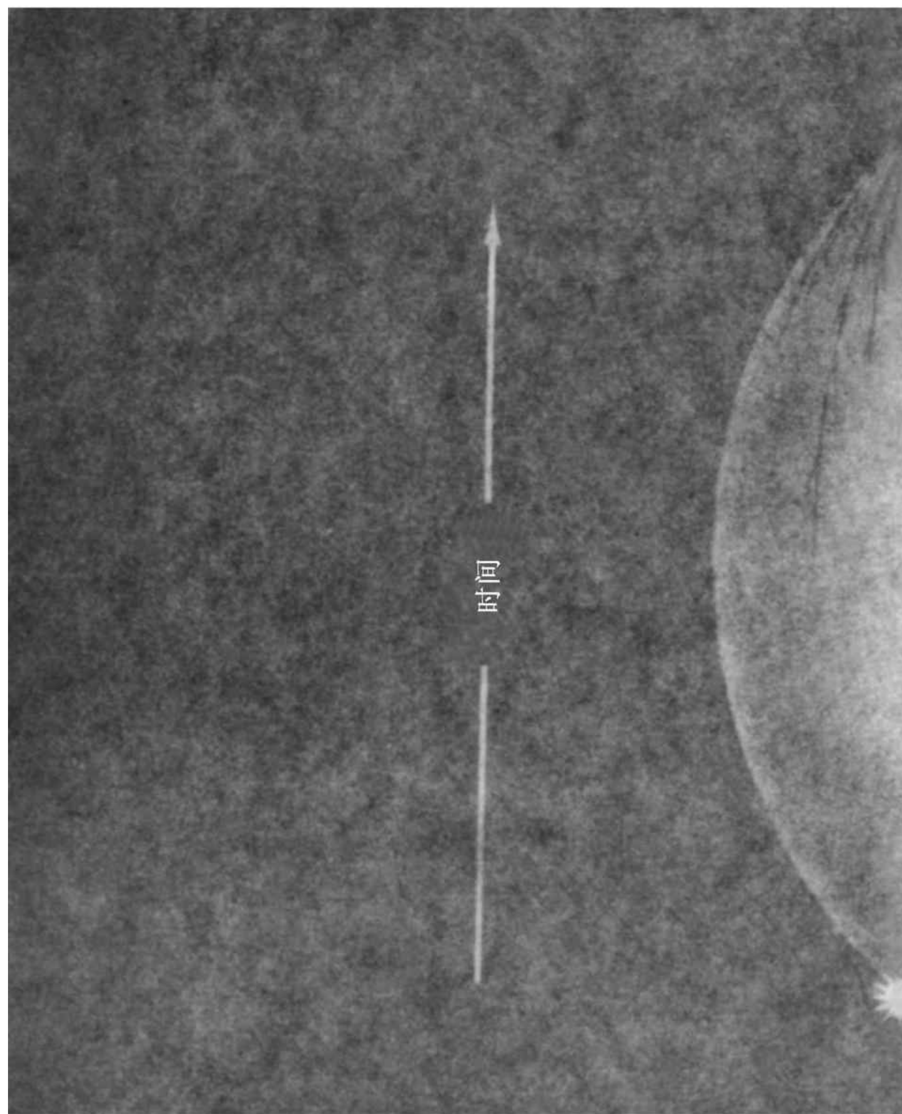
尽管那种观念具有巨大威力，在统一这些概念方面仍然可以走得更远些。如果你用虚数来测量时间方向，那你就得到了空间和时间之间的完全对称，这在数学上是非常美妙和自然的观念。无边界设想就是利用这个数学的单纯化，导致所有可能的宇宙的初始条件中的最简单的理论。

但是，人们不应认为日常经验中可以直接体验到虚时间。它是一种用来表达物理方程式的美丽的数学观念，同时在此情形下，它是一个解释宇宙初始状况的特殊设想。

当·佩奇

霍金的奇性定理指出，爱因斯坦的广义相对论和一定的观测相结合，意味着宇宙在开端处必须有一个奇点。如果你向时间过去回溯，到

达某一点就不能再过去了。我们通常将此视为时间的起点。



“人们可以把实时间认为是从大爆炸起到大挤压止的一根直线。”（Time——时间，Big crunch——大挤压，Big bang——大爆炸）

这扰乱了许多假定宇宙为无限古老的人。霍金的思想指出宇宙有一个开端，有人觉得，这符合创世纪所描述的宇宙在时间中创生；虽然其他神学家说，上帝创世并不见得就发生在我们的时间里。

上帝也许可以创生一个无限宇宙，但是霍金的思想隐含着时间有一个开端。现在，我们当然知道，爱因斯坦理论在非常接近于那个开端处

不能成立。所以我们知道，该理论本身在那里失效。这就引起了这样的可能性：也许宇宙是无限古老的，或者也许是别的什么样子的。

现在许多人——包括我自己以及我认为连霍金都觉得时间概念本身在接近开端处失效，因此谈论开端之前是什么并没有意义：在此之前是否有无限的时间呢？还是只有有限的时间？宇宙是否有一个时间上的绝对开端呢？由于时间观念本身在这些极早的时刻并没有多少意义，所以这些问题有些是没有什么意义的。我们能肯定的是，就我们所知，时间有一个开端，可是这开端有一个点，一旦超过那一点，我们标准的时间概念就失效。

在哈特尔—霍金的无边界设想中，宇宙开端的方式是：时间的行为非常滑稽，在技术意义上时间是虚的。这样时间没有边缘，你似乎有一个地球的表面。譬如说你从北极出发，沿着经线往外走。这些经线的确从北极散开，北极是完全规则的。

这就是霍金的宇宙图像：这个虚时间既没有开端也没有终结。它没有必要永远前进。它是有限的，如同地球只有有限的面积一样。在地球上不可能永远继续向北走下去。由于你可以走到最北的一点，在某种意义上，你会走到尽头。但在另一种意义上，在那里并没有真正的终点。

因此，霍金说，宇宙在开端处没有边界，所以宇宙是一个自足的整体。他还论断道，上帝实在没有必要去启动宇宙：宇宙能够自身存在那里，不需要上帝去创造它。

史蒂芬·霍金

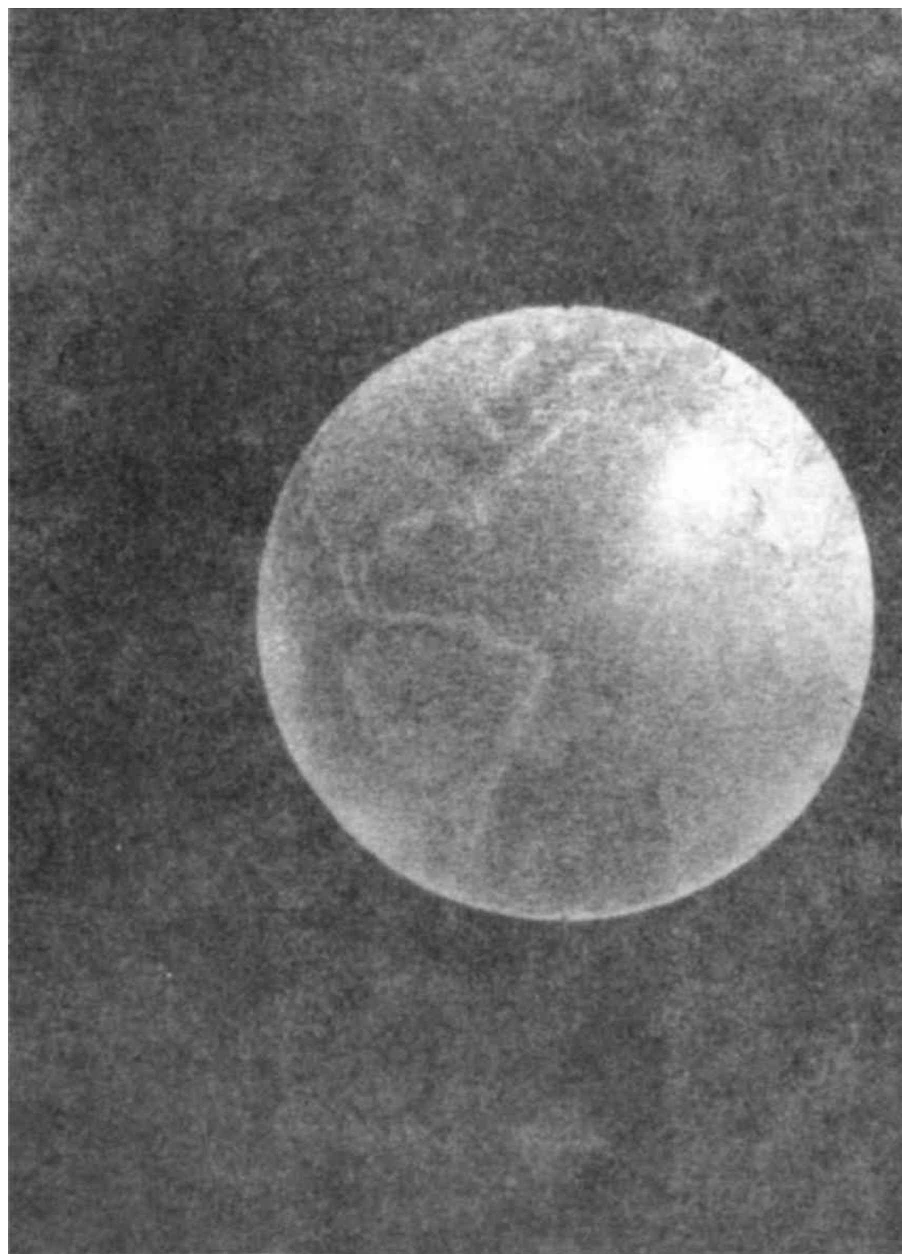
许多人相信，上帝允许宇宙按照一套定律来演化，上帝并不干涉演化的过程促使宇宙触犯这些定律。然而，仍然需要靠上帝去箍紧发条并选择如何去启动它。只要宇宙有一个开端，我们就可以设想有一位造物主。但是，如果宇宙确实是完全自足的，那还会有造物主的存身之处吗？

当·佩奇

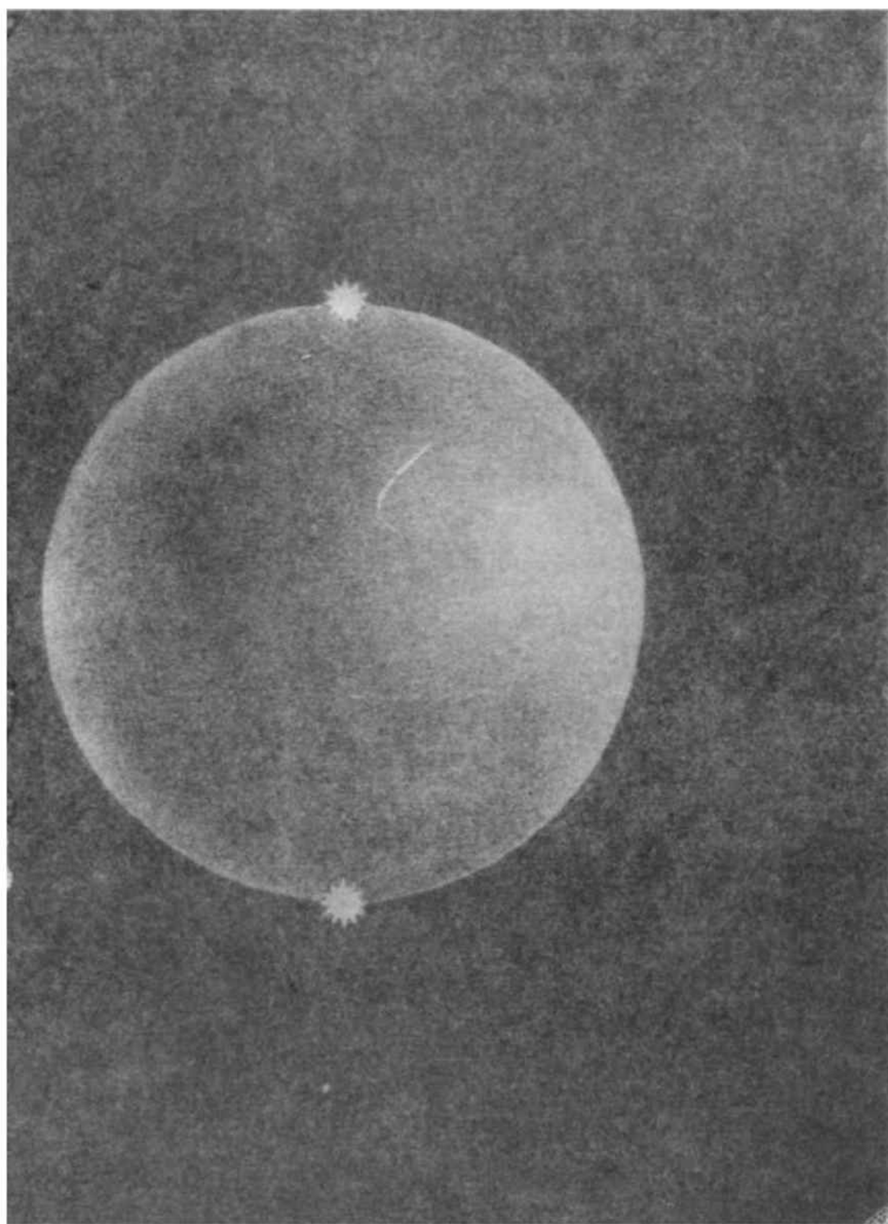
上帝是否创造宇宙的问题和宇宙是否有边缘并没有直接关联，尽管

许多人认为是相关的。它们实际上是不怎么相干的。

例如，我在一张纸上画了一条直线和一个圆圈。这条直线有两个端点，如果我想象时间以那种方式前进的话，则你可把这一个端点称为起点，另一个端点称为终点。如果时间沿相反方向前进，则情况就相反，这一个端点称为终点，另一个端点称为起点。你可将此当成宇宙的一个模型，一个具有开端和终结的宇宙。



无边界设想：宇宙的历史也许和地球表面相似，它可以从和北极相当的单独一点出发，继续延伸到南极，可是既不存在开端，也不存在终结



这个圆圈表示另一个宇宙。当时间前进时，在某种意义上存在一个最早的时刻；可是如果你沿着这圆圈的线，该线没有终点，它只是不断围绕着。

但是，我自己画了这些线，所以在某种意义上而言，我创造了它

们。但是它们是否有开端或终结，对我是否创造了它们的问题毫无影响。

我认为宇宙的情形是类似的。在霍金的旧模型中，宇宙具有一个开端，也许还有一个终结。新模型更像这没有开端和终结的圆圈。在某种意义上它有个最左的端点，这样你能说有某种像是最早时刻和最晚时刻的东西。但是，就更技术性的意义来说，既不存在开端也不存在终结，而且这两种都可以由上帝来创造。我们必须先有信仰，才能问它是否由上帝创造的问题。这是科学既不能证实也不能证伪的事体。

我想，霍金在他的书中小心避免直截了当地公开说没有上帝。他仅说：还会有造物主的存身之处吗？然而我想他希望人们从这里得出何种结论是十分明显的。

约翰·泰勒

我认为，许多人为了解释宇宙极端复杂的性质和宇宙可能没有目的而觉得上帝非常重要。我绝不会排除它对于人们一生的伟大的帮助。

依我的观点，上帝除了可能是第一原因之外，不会和其他细节相关。但是作为一个实用唯物主义者，我认为上帝是按照决定第一原因的定律描述的。怎么描述它，我不知道。可以说我们还没到达开始理解的阶段。

我觉得我们需要继续并更深入了解上帝的性质。因为如果你问我："你觉得上帝是什么？"我会说："它是宇宙的性质。"而且我觉得我们也许会一直继续下去：在我们现有理论的背后总有另一种理论，总可以采取下一个步骤。在某种意义上，这也许是避免必须触及第一原因的方法。

所以，如果一位科学家说"我们已经走到尽头了"，我就会回答"请仔细地想想。也许宇宙的性质的确是无限复杂的"。可能有一个理论具有无限复杂的系统，其中有趋向越来越短的距离的无限的理论序列。我们也许能得到一个超理论，这点我不清楚。事实上，你可以说，如果上帝正如在理论中指出的那样，是宇宙的终极性质，那么无论如何必须对如何去控制这理论有所解释。

在那个问题中牵涉到这么深的逻辑问题，而且我们可能沿着理论序列走的路还不够远，还看不到其中的结构。我们在会走路之前，绝不要急着跑，这也许是真理。

我觉得，宇宙的目的是以必须前进的方式来前进，并且只能以那种方式前进；同时还令人想到某种形式的人类目的，那目的即是达到满足宇宙动力定律的目标。除此之外，我看不出其他目的。

罗杰·彭罗斯

我不清楚人们在与宇宙或者物理定律相关时使用“目的”这个词和个人在企图完成某件事情时所用的“目的”一词的含义是否完全相同。我认为在某种意义上，宇宙具有目的。它的存在不仅是由于机遇。

有些人采取的观点认为宇宙就在那里，并且漫无目的地运转。它有点像在计算，我们刚好偶然地发现自己是其中的一部分。我认为用这种方法看待宇宙，既无成果又无帮助。我想，宇宙和它的存在有些远为深入的东西，我们现在只有非常肤浅的领悟。

约翰·惠勒

我走进一个房间，所有朋友都笑嘻嘻的。我知道他们又出了什么鬼主意。我还是先发问：

“它是动物吗？”

“不是。”

“它是植物吗？”我问下一个问题。

“不是。”

“它是无机物吗？”我问第三个问题。

“是的。”

然后，我问下一个问题：“它是绿色的吗？”

“不是。”

“它是白色的吗？”

“是的。”

我继续下去。但是我注意到我的朋友花越来越长的时间回答。我就是不明白为什么。因为他们心中有这个名词，为什么就不能直接告诉我是或者不是？

我知道我只能问20个问题，而且很快就得在脑中找出某个名词。所以，我最后问一位朋友：“它是云吗？”

他想了又想，直到最后才说：“是的。”然后他们全都大笑起来。他们解释道，当我走出房间时，他们还没选定哪个名词，后来他们达成共识不选定任何名词。任何人都可以随意回答我的问题，只是要附上一个条件：如果我挑战而他不能回答，则他便输了。所以对我们每个人而言，其棘手的程度完全一样。那个名词在我进来以前并不存在，只是视我选的问题而存在。然而其存在不仅仅是通过我的问题，同时也通过我的朋友们的反应。

电子的情形也是如此：我们从前认为存在于原子中的电子具有位置和速度，现在我们知道它在原子中没有位置或速度。直到我安装好测量仪器去测量才得到答案。所以，世界不可避免地具有这种参与品格：我们不仅是观察者，在我们有权断言已经发生的事物中我们也是参与者。

由于和旧观念相冲突——譬如爱因斯坦认为宇宙早已独立存在，宇宙的这种参与品格成为量子论最富有挑战性、最能刺激人们寻求解释的特色。爱因斯坦对量子理论的这种认为我们多少被牵扯到致使我们说已经发生的事情之中的观念感到不满。因为他年轻时，经过内心苦苦挣扎之后得到的观点是：世界是独立于我们而存在的。在量子物理中，情形刚好相反。

在量子力学的论争中，我曾与另一位伟大的人物——哥本哈根市的尼尔斯·玻尔合作过。我认为在过去几世纪中，从未有过比玻尔与爱因斯坦之间更伟大的，或者更高水准的，延续了28年之久的同行论争。简单来说就是：世界是否像爱因斯坦认为的那样独立于我们而存在，或者正如玻尔认为的，在某种意义上因为我们选择测量仪器，而使我们和测量

的结果有些相关？包括我本人在内，物理界大多数物理学家都觉得，这场辩论已经由玻尔得到决定性的胜利而告终。

今天，对于物理界的许多物理学家而言，量子理论是一台魔术香肠绞碎机：你把固态理论放进去，你把原子理论放进去，你把激光理论放进去，总之你把任何物理问题放进这个20世纪最高的物理原则这台香肠绞碎机中去，你转动把手，答案就会出来。

事实上，量子理论不是可以简单分析的。它是一种不可逃避的东西。它向我们展示，我们所说发生的事物，或者我们有权利说发生的事物，不可避免要依赖我们的测量选择。这种选择是不可挽回的，没有机会逆转它。因此，我们在此得到了解释存在真相的革命性的一面。

人们最后一次访问尼尔斯·玻尔时，他显得快乐、有兴致、风度迷人、关心别人。他不知道自己第二天就要死去。他评论道，某些哲学家没有意识到量子理论中有些关于世界的真正新发现，正如他说的："具有非常伟大的重要性。"他还写过有关我们真实世界的观点不同于我们早先所以为的以及我们如何注定要进行一场革命性的变化。爱因斯坦在最常被论及的一篇文章中说道，按照他的理解，量子理论和每一种合理的真实世界观念都冲突。玻尔对此的回答是："你的实在观念过于局限了。"

詹姆·哈特尔

任何超过12岁的人都知道，在这个世界上没有确定性这回事，因此物理学必须面对概率。

有人认为，人类因为无知，也就是还没拥有对世界足够精细和准确的描述，才和概率打交道，若是我们找到那个描述时，就拥有了确定性。这只是经典物理的幻象。60多年来，我们知道这种幻象是错误的。或然性是根本的，不确定性是不可回避的。所以任何东西，尤其是宇宙的量子力学理论并不预言一个特殊的宇宙时间历史。相反地，它预测将发生的各种可能性的概率。

有些事物当然比其他的事物更具有可能性，量子力学规则告诉我们这些事物是什么。而且我们讨论的宇宙历史是一直回溯到开初所有的事件。没有任何一类事件是被物理定律立法规定的；所有事件都是可能的，只不过其中一些比另一些的概率更高而已。量子宇宙学的任务是，

指明由量子理论预测到的概率非常高的事物。

各种不同的宇宙和各种不同的历史，有时被认为是同样真实的，我认为这种观点并没错。和概率打交道的量子力学理论正是必须处理不同的选择组合，因此人们能说，它们都是同样真实的。可是，更准确的说法是：我们是在处理整个集合的可能性集合，集合中的任何一种可能都曾发生，其中一些比另一些更可能发生。

史蒂芬·霍金

有一次爱因斯坦问道：“在建造宇宙时上帝有多少选择呢？”如果无边界假设是正确的，在选取初始条件上，上帝就根本没有自由，而只有选择宇宙要服从的定律的自由。

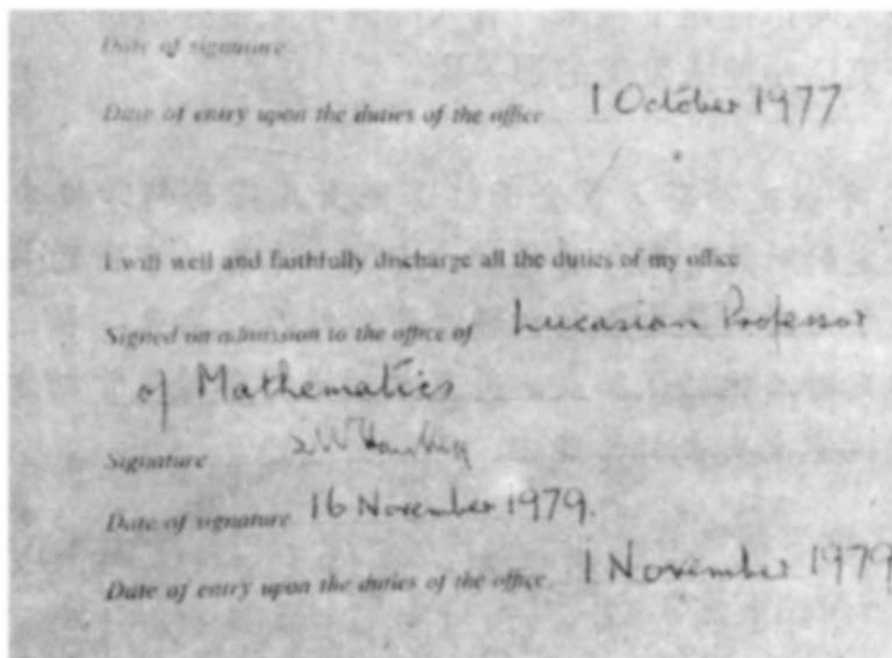
然而，也许这种选择并不算回事。也许只存在一种统一理论，该理论允许像人类那么复杂的结构存在，而且他们能研究宇宙定律和探索上帝的性质。

第5章

白纳德·卡尔

当史蒂芬和我在加州理工学院时，我们在午餐时讨论过名望的性质。他提出的定义是，名望是知道你的人比你所知道的人更多。午餐后我们回到系里，有一个人从旁边走过并打招呼：“你好。”我不知道他是谁，因此我说：“史蒂芬，那是谁？”史蒂芬看了我一眼，他那时还能讲话，他说：“那是名望。”

史蒂芬·霍金



Date of signature

Date of entry upon the duties of the office 1 October 1977

I will well and faithfully discharge all the duties of my office

Signed on admission to the office of Lucasian Professor of Mathematics

Signature

Date of signature 16 November 1979.

Date of entry upon the duties of the office 1 November 1979

“这是我最后一次签名。”

1979年我被选为卢卡斯数学教授。这是伊萨克·牛顿曾经担任过的同一教席。他们有一本大书，每个大学教授都必须在上面签字。在我担任卢卡斯教授一年多后，他们意识到我从未签过字。所以他们把这本书带到我的办公室来，我勉为其难地签了名。这是我最后一次签名。

白纳德·卡尔

我很敬畏我的导师史蒂芬。人们对自己的导师总有点敬畏。而当导师是史蒂芬时，他显然会使人更加敬畏。

另一方面，当我在史蒂芬家生活了一年后，他成为我的朋友，所以我对史蒂芬知之甚详。史蒂芬在那些日子里仍然能讲话，是以一种和他不熟悉的人很难理解的方式讲话。他仍然做学术报告，尽最大的努力使人们听懂。但是，通常我们开会时，史蒂芬的学生或者他的家人必须经常做翻译。

随着岁月流逝，情况越来越严重。有一次史蒂芬离开酒会，有人帮助他下楼。史蒂芬想对这个人说点什么，可是这个人听不懂，所以史蒂芬自己就不停地重复。这个人变得非常忧虑，并且想道："我的老天，这也许非常严重。史蒂芬可能病得很重。"因此，他急急忙忙离开史蒂芬跑到楼上来，"快来帮助我，史蒂芬需要帮忙！"

每个人闻讯都跑下楼来，有人能翻译史蒂芬所讲的，他只是在讲一个笑话中使人发笑的那一段。

> 1982年当史蒂芬·霍金面临着他女儿露西新学校昂贵的学费时，决定针对没有科学背景的读者写一本有关宇宙的书。1984年他完成了《时间简史》的初稿并进行修改。后来，在一次访问瑞士日内瓦时，他得了肺炎，并且必须进行急救气管切开术，这种手术使他完全失去讲话能力。

布里安·维特

他在瑞士生病了。回来时，他必须靠通气管呼吸，在他的喉咙插入了一根管子。从那个时候起他就不能讲话了。

我记不得他在剑桥住了多久的加护病房。可是在那个时期，也许有两个月之久，由于他不能和护士交谈，所以每周有两三天我就在医院中过夜，不仅是因为他病情严重，也因为护士根本不能理解史蒂芬要什么。如果他不舒服，她们不知道为什么。我们一些人实际上全天候在那里。

很长一段时间以后，至少感觉像很久以后，有人发明了一种聪明的玩意，一块中间开一个洞的塑胶板配上字母。当你把塑胶板举在你和另一个人之间，他盯着字母，你就能说出他在看哪个字母。大部分时间你能做到这一点。有时不能完全确定，所以必须耐心地把他想要的说出来。他们挑“A”，而你说“A？”这正和猜谜语一样。

史蒂芬花了很长时间，才能接受利用电脑沟通的主意。这不仅是“啊，我不想麻烦”，而是“我不要这么做”。史蒂芬不愿意接受他不再能讲话的事实。他认为找到一种言语以外的沟通方法是表示屈服。

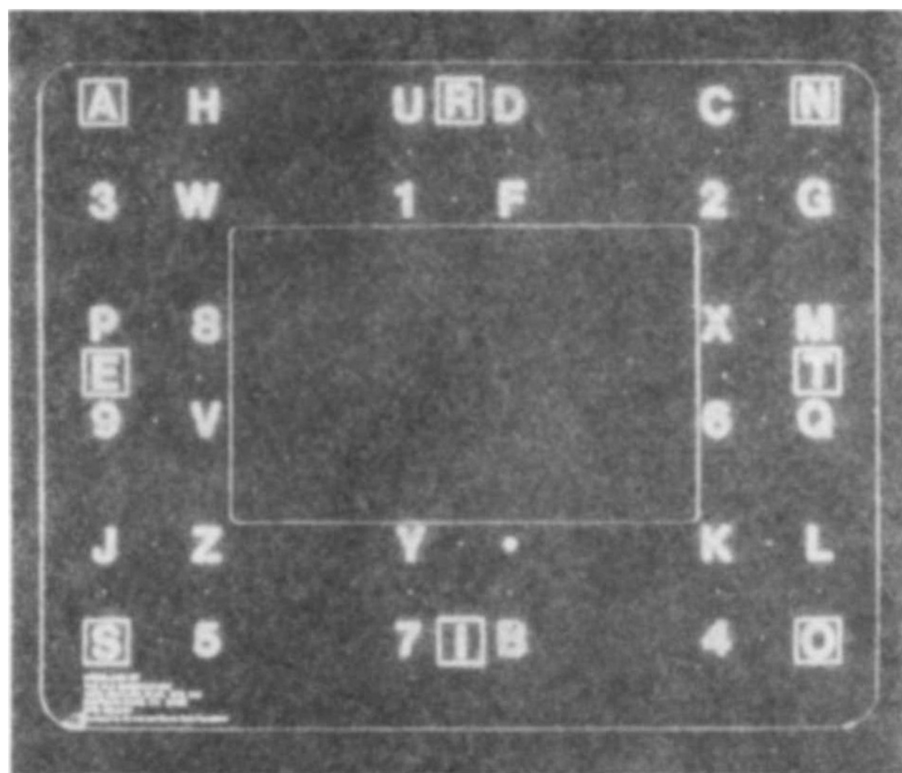


布里安·维特从1982年到1985年，在史蒂芬·霍金指导下写有关量子引力的博士论文，之后以研究员身份和霍金工作三年。现在在剑桥开了一家电脑公司

我记得有一天晚上去他那里，他第一次叫我帮他起床去用电脑。在打了“你好”以后，他打的第一句是：“你愿意帮助我完成我的书吗？”史蒂芬在这类事情上总是非常礼貌的。

史蒂芬·霍金

在手术之前，我说话变得更不清楚，只有少数和我很熟的人才能理解。我要依靠向秘书口授来写科学论文，还要通过一名译员来做学术报告。气管切开术使我完全丧失了说话能力。



在一段时期内，这台装置是史蒂芬·霍金用来交流的唯一方式

布里安·维特

他能综观事物如何运行。当他不愿说“看这篇论文，这就是证明”，史蒂芬是试图理解世界运行的方式，他说：“根据我的理解，这必须是它运行的方式”，而不是根据他当时已知的可以证明这一点。

当然，有时他也会弄错。有时他告诉你一些东西时，你会离开去计算，然后回来对他说“看，你弄错了”，而他不会相信你。以后你会谈论这些，你会在两周后意识到他是对的，他的预感比你的计算强得多。我认为这是他头脑中非常重要的一面：靠直觉思维而不必一步一步推算，

跳过简单计算而直接得出结论。

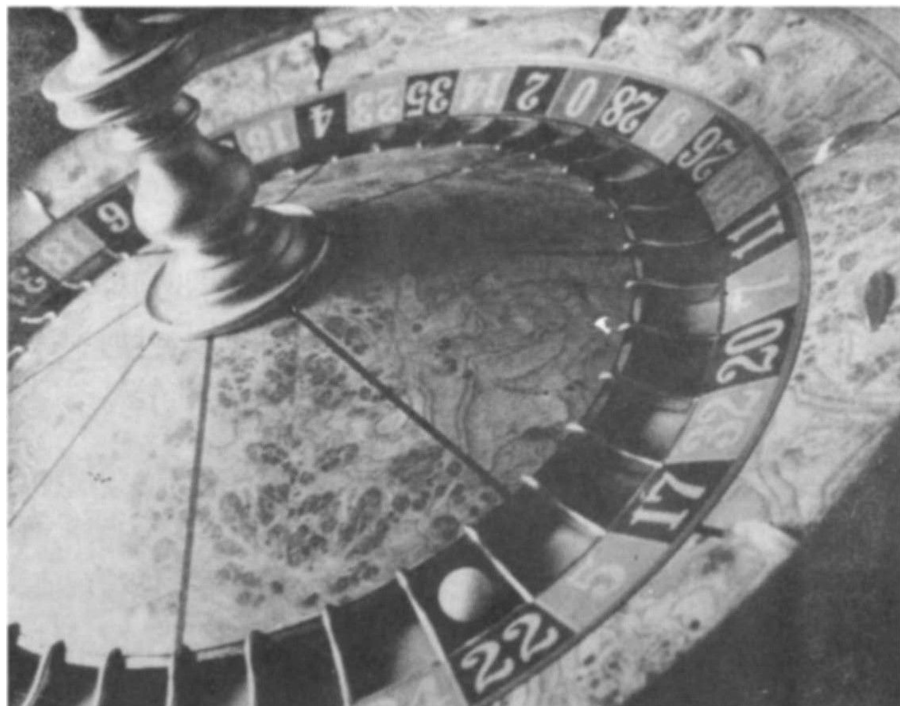
我们两人都有谈论科学的强烈欲望。让科学家以外的人理解科学为何物是很重要的。我们都热切希望写一本大众要读的书，尽管我们从未预料过后来发生的事。

史蒂芬不愿在精确性上作任何妥协。你有时当然必须润饰一下，也不可能解释每一个细节，可是要尽量地做。如果你使用比喻，你不愿意在第一道障碍即告失效。你希望使用足够精确的比喻，使得如果有人要利用它思考时，他们不会把这种比喻过分外推而使之丧失意义。我们花费大量时间来讨论比喻，并且推敲其可行性。例如，史蒂芬在第一稿中要用科学术语来解释某些东西，后来他说：“噢，没人能理解那个。让我们使用比喻来取代。”我们刻意一步步地这么做。现在，其中的一些比喻当然是沿用爱因斯坦或其他人历史性的解释，可是有些是我们提出或加以改善的。

例如，我们用这样的一个比喻来解释如下复杂概念：在低能量时显得不同的粒子，也许在高能量时实际上是相同的粒子。你说：“我们这里有不同的东西，而且我们能看到并能解释它们如何不同，它们具有不同质量、不同性质等。”然后你会说：“但是根据我们的理论，这些东西在高能量时是同样的东西，它们只是在低能量时显得不同。”那么，这是什么意思呢？

我们使用轮赌盘上转动的球来比喻。当旋转轮盘时，球会快速滚动并接触到任何一个数字。所以球停在轮盘的任何格子内实际上概率是相同的。随着整个系统慢下来并损失能量，它最终会落到一个数字上，譬如22。22这个数字并没有任何特殊之处。能量降低时，同一个球可能落到任何其他格子内。而且如果你重新旋转轮盘以增加能量，那么它又会一蹦一蹦地跳跃，并可能落到其中的任何一个数字上。

这就是苦思熟虑后得到的一个比喻。我们想要得到的是一个可以摹像的比喻。



因·莫斯

史蒂芬上午离家，自己操作轮椅，11点到达办公室。因此大部分人也在11点到。之后我们开始喝咖啡聊天。一直到中午左右去吃午饭，午饭从中午1点左右开始，直到下午3点左右结束。



因·莫斯是史蒂芬·霍金20世纪80年代初在剑桥的研究生。现在在纽卡索大学任物理讲师

大家会问史蒂芬对他们的研究或者任何有趣东西的看法，不停地讨论，如果必要的话可以花费整个下午的时间。我们老是坐在咖啡室里讨论，还能完成任何工作真是奇迹。我已记不得我们什么时候曾坐在办公室里做研究。那种气氛很好。

布里安·维特

主要因为史蒂芬愿意为学生花费大量时间和心力，所以他是一位非常好的老师。很多大学教授显得非常疏远，他们很少和学生见面。史蒂芬整天都和学生见面。

他说的话几乎无法听得懂，只有几个人能听懂他的话。后来当他失声后，情况当然也就改变了。可是在某些方面反而变得更好了，因为失声后，他反而能和每个人沟通了。

克里斯多福·伊宣蒙

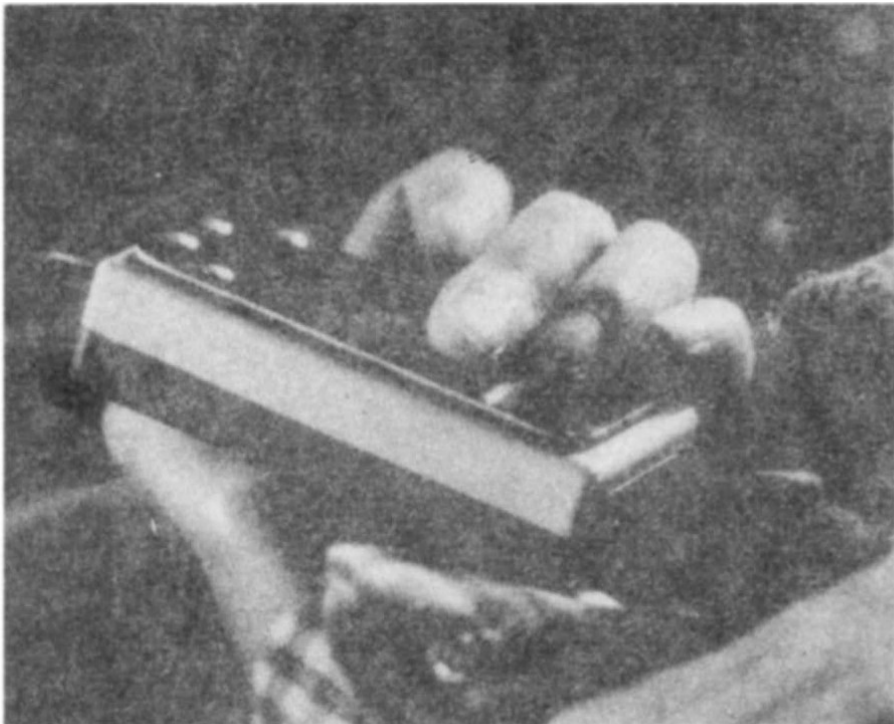
在他仍能讲话的日子里，还是有可能理解他说的话。但我发现如果我离开很久，就会丧失这个能力。不过当我回到他身旁时，在两三分钟里又可以重新明白他的话。有时候当他与不熟悉他的研究生讲话时，而不能使他们理解他讲的话，他肯定会非常懊恼。现在由于使用语言合成器，情况当然也就不同了。

史蒂芬·霍金

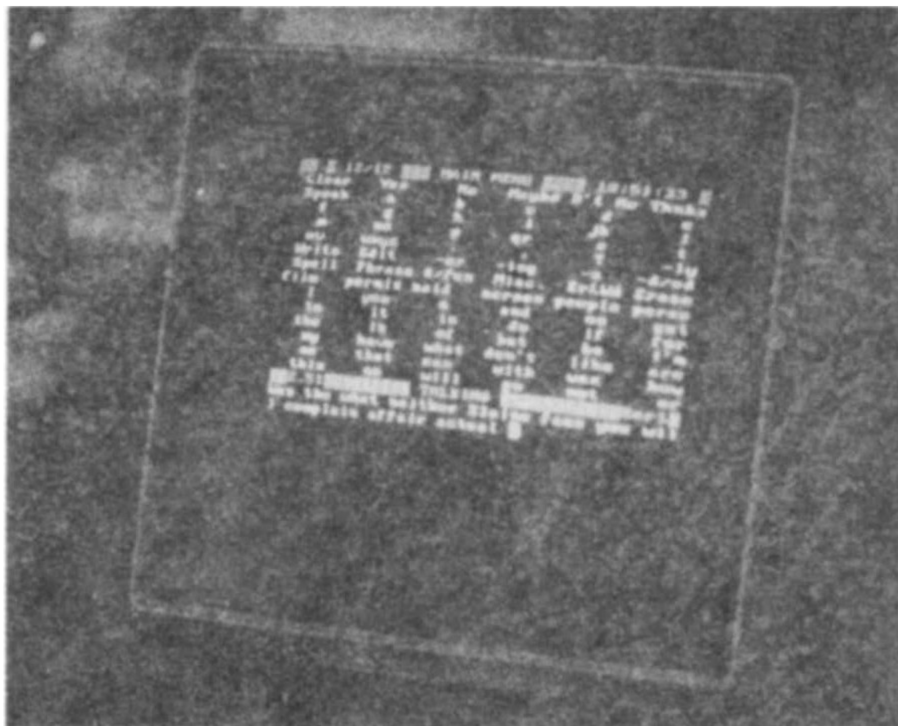
在做气管切开术后的一段时间里，我唯一的沟通方法是一个字母一个字母地把词拼出来。在某个人指着拼写板上正确的字母时，我就扬起我的眉毛。如此进行交谈当然十分困难，更不用说写科学论文了。

然而，加州一位电脑专家听说我的困境，就给我寄来一套电脑软件，它能让我从屏幕上一系列的目录中选择词汇，只要我按手中的开关即可。这个软件也可由头部或者眼睛的动作来控制开关。当我累积了足够多要说的话，就可以输送到语言合成器。这台合成器连同一台电脑安装在我的轮椅上。

这个系统使我与人交谈比以前容易得多。我可以在1分钟内组合15个字。我可以把所写的文字用合成器说出来，或者存到磁碟里。



史蒂芬·霍金用来操作他电脑程序的装置。它可由他的手、头或眼睛的运动控制。它因开关所产生的声音而被称作“排字工”



一个人的声音很重要。如果你的声音含糊，人们很可能以为你有智能缺陷。我的合成器是我迄今为止所听到最好的，因为它会抑扬顿挫，并不像一台机器在讲话。唯一的问题是它使我说话带有美国口音。

法兰克·霍金在史蒂芬气管切开术的恢复期间得了重病，并于1986年去世。

玛丽·霍金

我父亲花费极多时间研究所有被试过或已知的运动神经疾病治疗方法。他的同事说，他等于停职一年在做这件事，接触任何可能知道或尝试过任何方法的人。甚至直到今天，我仍然陆续收到寄给他的有关慢性病毒的研究论文。

伊莎贝尔·霍金

他父亲的死使他非常难过，这是一件悲惨的事。史蒂芬做完气管切开术后在医院住了很长的时间，并且没有特别合适的车可供他往返。让他回来非常困难，我去看史蒂芬也是同样困难，这是因为他父亲需要我。玛丽是一名医生，所以由她就近照料。所以除了玛丽外，没人意识到他们父亲已经濒临死亡。她打电话给史蒂芬并告诉他。他以前都不知道。我想他第二天就赶回来了。他非常喜爱他的父亲，可是后来他们变得相当陌生，最后几年也很少见面。

我认为史蒂芬对他父亲的研究毫无兴趣，而他的父亲从未试图使史蒂芬对它感兴趣，因为他们的兴趣截然不同。但是，他们有许多共同点。因为他简洁的思想，对史蒂芬是一种莫大的启发。

史蒂芬在他父亲死之前正在写《时间简史》，所以我认为他们在此书的早期阶段就讨论过它。我想，事实上他父亲读过初稿，而且非常感兴趣。

力学（不管经典的还是量子的）不能区分时间的方向。如果你为绕太阳公转的行星拍电影，并把它由后往前放，反演的运动就和原先的一样很好地服从牛顿引力定律。它在原则上可以是某个遥远

太阳系行星的实际运动。

可是宇宙具有一个较偏爱的时间方向。恒星把它的核燃料烧掉、动物变老、人们记住过去而不是将来的事。更有甚者，所有恒星、动物和人都往同一方向做这些事，而不是我们一些人记住过去，而其他人记住将来。有一个普适的时间箭头存在。

人们在一个多世纪前就已经理解了时间箭头是怎么引起的。取来一副新牌，并用任何方法洗牌。洗三四次并且在每次重洗之前记录牌的顺序。得到这种记录的人毫不费力即能把它们按时序排列。第一个记录即是盒子是新的时候，牌按照顺序排列。下一个记录是牌有些乱，再下一个就更乱些（在洗了四五次后，纸牌就变成完全无序了，而这个过程就失效了。但是，如果你想象用比52张多很多的牌开始，你要进行比其更多的次数这才会发生）。

这与如何洗牌的细节无关。更重要的是你必须从一副新牌开始，而且这副牌具有高度顺序的条件。按照热力学第二定律，不仅仅是洗一副牌，任何力学过程都会增加（至少不会减少）一个系统的无序度。如果宇宙，正如一副新牌那样，从一个高度有序的条件开始，这个原则足以解释所有观察到的时间箭头事件（尽管在某些情形下，展现这理论的推理过程既冗长又困难）。

因此时间箭头的一个完整解释必须说明为何宇宙是这样开始的。这是宇宙学的问题。

史蒂芬·霍金

如果宇宙停止膨胀并且开始收缩时，将会发生什么呢？热力学箭头会不会倒转过来反演，而无序度开始随时间减少呢？我们会看到破杯子的碎片集合在一起，并从地板上跃回到桌子上吗？我们是否能记住明天的价格，并在股票市场发财呢？我觉得宇宙在坍缩时，会回到一种光滑有序的状态。如果情形果真如此，则人们的生命在收缩时会往过去回溯。他们先死后生，随着宇宙再次变小，他们会变年轻。最终他们会消失并回到子宫中去。

雷蒙·拉夫勒蒙

他给了我第一个研究问题。实际上当他给一个问题时，已经差不多知道答案应是什么。我仔细推敲了几个月才理解他给我的问题。我回来对他说：“史蒂芬，这是我的答案。”

他对我说：“不，那不是我所预料的。”



雷蒙·拉夫勒蒙是法裔加拿大人。1984～1988年他在史蒂芬·霍金指导下学习。他关于量子宇宙论/宇宙波函数的研究推翻了霍金的在宇宙收缩时，时间箭头会反向的理论。他现在是剑桥彼得学院的研究员

但是我说：“史蒂芬，那是我得到的答案。”

我走到黑板前进行解释。他说：“你想过这种特殊情形吗？”

我说：“噢，我没有。”

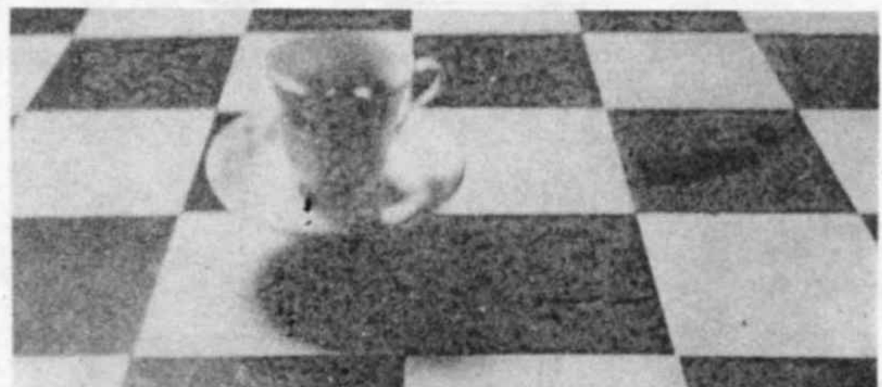
因此，我回去计算他对我所讲的，几周后又回来。我说：“史蒂芬，我没有得到这个。我仍然得到原先的那个答案。”

他说：“不，不，这不行。你想过那个没有？”我说：“噢，没有。我忘记了那种特殊情况。”

这样我又回去开始重新计算。我再次得到同样的答案。因此我回去见史蒂芬。这大约拖延了两三个月。他最后说：“也许你有一个近似不能成立。”于是我和一位合作者决定利用电脑来计算。这花费了大量时间，写出所有程序，把它算出来，还得保证程序是正确的。







“如果宇宙停止膨胀并开始收缩时，将会发生什么呢？热力学箭头会不会倒转过来，而且无序度开始随时间减少呢？我们会看到破杯子碎片集合在一起，并从地板上跃回到桌子上吗？”

我们仍然得到我以前得到的同样结果。

此刻，刚好当·佩奇进来了。他说：“雷蒙，我对那个结果十分感兴趣，因为我得到大致相同的结果。不过是从不同的角度。”

于是我们决定必须去说服史蒂芬，在时间箭头特定的领域内我们是对的。我记得当告诉我："我们最好慢慢进行。先使史蒂芬对我们的假设信服，再告诉他最后的结果。因为如果我们告诉他结果，而这结果又不是他要的，他就会下结论说我们的假设有什么地方错了。"相反地，我们决定在告诉史蒂芬结果前，先确立我们的假设，这样他才会同意。我们共花了大约1个月，最后才说服史蒂芬相信我们是对的。

史蒂芬·霍金

我犯了一个错误，原因在于我用了一个过于简单的模型。当宇宙开始收缩时，时间不颠倒方向，人们会继续变老，所以不能指望等待宇宙收缩时去恢复你的青春。



史蒂芬·霍金在他办公室的书桌前

白纳德·卡尔

在某种意义上，史蒂芬永远在面临着死亡。随时死亡的可能永远存在。我认为在史蒂芬的事业发展中，这是一个重要的因素。因为他意识

到时间可能是短暂的，他必须非常快速地工作，所以他决定专心一致地迅速工作。

我认为一个鞭策史蒂芬前进的原动力，是他要理解宇宙的坚定决心。我们谁也逃脱不了死亡，对于史蒂芬更是如此。因而它提供了一个强烈的动机。



从书桌后面看到的情景

人们总爱提的一个问题是：如果他没有生病的话，能否对科学做出如此伟大，甚至更伟大的贡献？他的残疾是否阻碍了他的科学贡献，这我并不清楚；如果他没生病的话，也许不能产生这么多好的成果，所以我认为各有利弊。

史蒂芬·霍金

宇宙有两种可能的结局。它可以永远地膨胀下去，或者它会坍缩而在大挤压处终结。我预言宇宙总有一天会终结于大挤压之处。然而，我比其他的末日预言者都占便宜，不管100亿年后会发生什么，我不期望自己会活到那时候而被证明为是错误的。



1988年8月，史蒂芬·霍金和当·佩奇以及佩奇一岁的小孩合影于他的书房里

当·佩奇

我们最近住在莫斯科的一个饭店里，那里有一间小小的舞厅。史蒂芬想找我们中的一些人去跳舞。我们中没人有这等勇气。但是后来在我们出来的路上，大家都得通过这舞厅，而史蒂芬在大厅里转动着他的轮椅，真是一大奇景。

因·莫斯

轮椅是旅行中的一个后勤问题。因为它必须放到飞机里同行，如果把它放到行李舱里，那么史蒂芬就必须在附近花一两个钟头等待行李出来，在这之前没有地方可以安置他，这可是一个大问题。有一次他十分坚持，空中服务员也就同意把轮椅放在头等舱的座位上，而我们都坐在二等舱。此外，他在机场通过安全检查也是一个大问题。因为任何坐轮椅的人都得通过金属探测门，而轮椅过不去。

只有一次，安全人员坚持要搜查他，我认为这有损尊严。但是我能

想象史蒂芬的情形颇具危险性。事实上，我有一次就是把一盒雪茄藏在他的轮椅中而走私过关的。

当·佩奇

当霍金被选为皇家学会会员时，他是最年轻的会员。皇家学会在一两年后也选了查理王子，并邀请一些比较年轻的会员来伦敦。我没有去。可是简回来说，查理王子极爱史蒂芬的轮椅。史蒂芬喜欢旋转这个轮椅来炫耀。结果在他旋转时压到了查理王子的脚趾头。我希望王子的脚趾头依然无恙。我想这是我和查理王子共同的经验。我们俩都被史蒂芬的轮椅压过。

史蒂芬·霍金

1991年3月5日，星期二晚上，大约10点45分，我在去往松林公寓的归途中。天黑又下雨。轮椅的前后都安有自行车灯。我上了格兰治路并且看到了汽车的灯光向我趋近，可是我判断它们还很远，我还来得及安全过马路。然而这车子一定行驶得非常快，当我刚好到达路的中间时，护士惊叫起来：“小心！”我听到了轮胎刹车的声音，而我的轮椅后面受到了极其猛烈的冲击。

我跌落到路上，我的腿还停在轮椅的残骸上。这次事故毁了我的轮椅，并且破坏了我借以沟通的电脑系统。我的左上臂骨折，我的头被划破，需要缝13针。

48小时之后，他回到办公室工作。

伊莎贝尔·霍金

他的确不相信自己在任何方面和其他人有何不同。如果他能做到，则任何人也能做到。这就是为什么他的书不是一本给专家看的书。我是说，他的读者是任何人，而且他相信任何人都能理解。他相信我能理解。我想这有点过于乐观。但是他真心相信这一点。

克里斯多福·伊宣蒙

正常情形下，你在做理论物理研究时，只需要在你面前放一张纸，在上面涂涂写写，然后想一想再继续涂涂写写。我扔到纸篓中的和记到笔记中的消耗率，大概是10:1。

而史蒂芬当然必须在他头脑中进行这一切。他论文最引人注目的是：他是真正地贯注于关键处，而不像我们一些人那样，受相关细节的诱惑。他使用时间非常有效率。他尽可能用最简单的方法，这在物理学中当然是很高明的。

我想，他的疾病在某种意义上对他的工作方法具有直接的影响。当然，其他明显的影响，是和科学家朋友沟通变得很困难，这对他来说一定是十分沮丧，对我们也是这样。你不好直接上前问他："看这个，我对这不理解。你看，你的论文中有一些问题，还有……"如果你这么做，他就得花大半天宝贵的时间才能给你恰当的回答。这明显地妨碍了科学交流。

我们在理论物理界有一种很有效率地传达研究成果的办法：我们相互寄预印本。只要读史蒂芬所写的，就能对他所做的研究有透彻了解。我认为他在许多方面使自己几乎像没有残疾那样工作。你确实不能从他工作的任何阶段，找到他正和可怕疾病搏斗的迹象，也许除了他发展出来一种特别清晰的风格之外。

我想，如果你有任何形式的残障，你会倾向于自我沉思。如果你是内向的人，这肯定对研究理论物理有利。理论物理实在是一种寂寞的工作。虽然人们有时两个人或三个人成组工作，但一天结束后，你必须独自坐下，伴随着一叠纸，进行自己的研究。

我想，史蒂芬的残疾鼓励他在特别适合应用深入思维的科学领域做研究，而不仅是处理一大堆繁琐计算。例如，有许多基本粒子物理的分支，一点研究就会牵涉到非常复杂的计算，不管是在纸上还是用电脑，都是大量的工作。很清楚，史蒂芬没有深入这类研究就是因为这个原因。相反地——尤其在近年，他有意深入研究那些需要专心思考的题目。他当然会讨论到形而上学的方面。他非常努力地思考它，还有关于量子力学基础以及它们如何和他的研究相关。在那个意义上，人们也许可以了解他的疾病如何使他更向内心集中注意力。

珍娜·韩福瑞

时间在霍金的理论中如此重要，我想这一点是意味深远的。一定是史蒂芬用他自己的经验来解释他的观点。我对史蒂芬过去的模样的记忆仍然是生动如昔。他总是好动，他喜欢动作和富有表情。但是这些都只成回忆。我最近找到了一些照片，使我想起了每个人大概的样子。我真的认为史蒂芬过去的模样和现在很相像。

伊莎贝尔·霍金

他非常强烈地相信人类头脑拥有几乎无限的可能性。你必须先找到那些超出你能力的，你才知道什么是办不到的，所以我根本不认为思想要受任何限制。为何你不应该继续思考不可思议的东西呢？总要有人先开始吧！1世纪前多少事情是不可想象的？当时一定也有人思考过，然而那些想法多半被认为很不切实际。史蒂芬说的一切，不太可能全被当作绝对真理。他是探索者，他在寻求事物。如果有时他说没有意义的话，我们不也都会这样吗？关键在于，人们必须思考，必须不停地思考，必须尽力扩展知识的边界，然而人们有时候不知道从何开始，不知道什么地方是边界，也不知道何处是起点。



约翰·惠勒

7月，有一天早上5点30分，在新墨西哥州的沙漠上，人们首次把一颗恒星放到地球上。1945年，那一点物体的行为和人们预期的一模一样。这为我们知道如何预言以及我们的理论是正确的提供了美妙的证据。

这超出了地球人类所有的经验。然而人们也可以说，爱因斯坦预言的宇宙的膨胀，是如此之荒谬，以至于在开始时连他本人都不能相信。这是最伟大的证据，表明人类具有这样的本领，即我们的理论是有效的，并能以超出我们原先意识到的威力来预言。我们曾经有过错误的理论，而科学界的好处是错误总会被发现。在从错误的理论中找出何处出错时，我们学会了某些新东西。

对我来说，围绕我们的世界，充满了古罗马人称为燃烧的世界城堡——人类知识的前沿。从基因如何起作用、生命如何繁殖、宇宙如何膨胀，直至黑洞如何吞没信息——所有这些不仅是科学的前沿，而且也是人类本身的前沿。依我的观点，现在我们仅是小孩，有这么多领域尚未被探索，这么多美妙事物有待揭示。我想，男女老幼都越来越意识到，现今我们正从事着人类最美妙的探险，就在此时此地探索着这些前沿。

史蒂芬·霍金

如果我们确实发现了一套完整的理论，它应该在一般原理上及时让所有人（而不仅是少数科学家）所理解。那时，我们所有人，包括哲学家、科学家以及普普通通的人，都能参加为何我们存在和为什么宇宙存在的问题的讨论。如果我们对此找到了答案，则将是人类智慧的终极的胜利——因为那时我们知道了上帝的精神。

语录

罗伯·白曼

“他显然是我所教的学生中最为优秀的。”

高登·贝瑞

“史蒂芬跌倒在楼梯上。”

白纳德·卡尔

“当史蒂芬和我在加州理工学院时，我们讨论过名望的性质。”

布兰登·卡特

“这是结束一个人生命非常刺激的方式。”

迈可·丘吉尔

“我忽然明白了，他是在鼓动我。”

诺曼·狄克斯

“有些舵手非常爱冒险，另外一些则非常稳重。”

詹姆·哈特尔

“任何超过12岁的人都知道，不存在确定性这回事，是不是？”

爱德华·霍金

“不管怎么说，因为这是我们的家，所以我们喜欢它。”

伊莎贝尔·霍金

“我们非常幸运，实在非常幸运。”

玛丽·霍金

“所以我总有印象，父亲们像候鸟。”

史蒂芬·霍金

“他们询问我未来的计划。我回答说要做研究。”

安东尼·赫维许

“谁会想到你会从天空接收到似乎是智慧的信号呢？”

弗雷得·霍伊尔爵士

“我宁愿去研究我认为可以解决的问题。”

珍娜·韩福瑞

“有一回他提议晚上跳苏格兰舞。”

克里斯多福·伊宣蒙

“你就得到这个没有过去的美妙图画——所以你真正能说的是宇宙存在。”

贝西尔·金

“我们用一包糖来打赌。”

雷蒙·拉夫勒蒙

“史蒂芬，我仍然得到原先的那个答案。”

约翰·马克连纳汉

“这个家庭就是会做那些古怪的事。”

因·莫斯

“我有一次就是把一盒雪茄藏在他的轮椅中而走私过关的。”

当·佩奇

“这是科学既不能证实也不能证伪的事体。”

罗杰·彭罗斯

“在穿过马路时，我得到某种观念，可是它在我头脑中被完全遮盖了。”

德瑞克·鲍尼

“有一天晚上我和他坐在那里，他问道：‘你读过约翰·但恩的哀歌没有？’”

派却克·沈德斯

“我在那时就很清楚，他对这课程比我了解得还多。”

邓尼斯·西阿玛

“我们跨出第一步之后便无法停止了。几乎每一年都有激动人心的新发现。”

约翰·泰勒

“当然你的手表或手腕都很悲惨地毁灭。”

基普·索恩

“他发展了一系列强有力的其他人都没有的工具。”

约翰·惠勒

“女孩是正常恒星，而男孩是黑洞。”

布里安·维特

“我们使用轮赌盘上转动的球来比喻。”

跋

高登·弗利曼

《时间简史》执行制作

有关《时间简史》电影和本书附注

《时间简史续编》的创作，是为了让《时间简史》的读者以及埃洛尔·莫雷斯所导演的摘录该书的纪录片的观众，对史蒂芬·霍金的生活和研究有一个清晰的了解。它包括称为《时间简史》的同名影片中的大部分资料，还有会晤、图解以及霍金教授自己的叙述。

霍金教授在本书前言中表示，他坚信关于宇宙的起源和命运的基本思想可以不用数学来陈述，而且没有受过科学教育的人也能理解。他在这一点上的成功是辉煌的，这已由该书在世界各地广受欢迎而得到证实，然而该书也可以说非常令人迷惑：史蒂芬·霍金以他写作的天赋和智慧使读者佩服，而其强有力的概念使读者渴望进一步了解科学以及作者。

这部电影和本书的创作动机，就是要更进一步探索这两方面。随着本书的进展，不仅游历霍金教授的世界，也游历了纪录片制作的世界。电影媒介让观众利用视觉来吸收人物的形象和复杂的观念，利用听觉来吸收声音和音乐。最有效地使影片成形并上演，是对影片制作者的挑战。用文字表达则有不同的挑战和要求。我们希望影片和本书能以不同的方式来回应渴望了解史蒂芬·霍金和他的研究的观众和读者。

筹划这部电影整整花了3年时间，总共耗资350万美元，而且得到罕有的激动人心的机会：去寻找形成史蒂芬·霍金个人宇宙和专业宇宙的那些人，并且把他们的洞察、意见和回忆编织成一幅完整的画像，当然还从霍金本人那里直接且详细地了解了许多。

当我们第一次找到霍金教授，要求制作《时间简史》电影时，我们察觉到一种关于在影片制作者和著名科学家之间合作的可以理解的焦急

之情。但是在开始的一系列会面之后，紧张情绪就转变成强有力的工作关系。在剪接最紧张之时，为了完成影片的最后剪辑，史蒂芬·霍金和埃洛尔·莫雷斯在剪接室里待了好几个小时。

这次制作把霍金和他家庭的几个成员、他的合作者、终生的朋友以及一些世界上一流的科学家带到一块。莫雷斯让人们在讲故事或描述他们研究的过程时阐释自己的神奇能力，制作成成千上万英尺的影像记录。这些材料是如此丰富，很快就明显地感到有必要写成一部书。因为像这样经由访问构成叙述核心的影片只放映90分钟，它只能使用实际影像的一小部分。此外，霍金教授写了大量精彩的叙述，由于篇幅限制不能全部涵括。

这部书利用了几百小时的访问，包括了9个未收录到电影中的人。我们让史蒂芬·霍金更充分、更直接地谈论他的生活和研究。本书还包括有关参与者和科学概念的背景信息、家庭照片以及特德·巴发罗柯斯没有用到影片中的艺术作品。

正是遵循着把影片作为史蒂芬·霍金极其重要的研究和他生活忠实写照的同一宗旨，才形成了这部作品。这部书对于影片制作者而言，似乎也是一部真正的文献。这也是除了创作此影片的人以外的许多人的心血。拜坦姆的总裁和出版家林达·格雷、拜坦姆的资深编辑——安·赫雷斯，由于她们的耐心、勤奋和洞察，而值得特别感谢。金·斯通准备了文字，迈克尔·孟德尔逊为这本书做设计，他们的投入和负责精神值得赞赏。本书的经纪人阿尔·朱克曼是这一规划的忠诚工作者。我感谢参与埃罗尔·莫雷斯访问的27位人士，不仅由于他们的时间，而且也由于他们对电影和本书直率而启发性的贡献。本片的科学顾问悉尼·柯尔曼提供了极有价值的帮助。我们特别感谢史蒂芬·霍金的职员：许·梅西、安德鲁·丹、斯图亚特·贾米逊和约纳逊·伯伦奇利。

埃罗尔·莫雷斯，英格利亚电视执行制作柯林·厄文，电影的制作者、英格利亚电视的大卫·希克曼以及我本人愿对史蒂芬·霍金致以最崇高的谢意。我们为能有机会在电影中阐释他的研究和他为这部电影和这本书所贡献的智慧、亲切和热情而衷心感激。

小辞典

反粒子

每个类型的基本粒子都有同一类型的反粒子。当一个粒子和这样的一个反粒子相遇时，它们就湮灭，只留下能量。

原子

通常物质的基本单元。原子包含质子和中子的一个核以及围绕着核转动的电子。

大爆炸

当宇宙的一切都处于具有无限密度和温度的单独的一点时，在宇宙开端处的奇点。

大挤压

当宇宙的一切都坍缩到具有无限密度和温度的单独的一点时，在宇宙终结处的奇点。

黑洞

空间—时间的一个区域，因为那里的引力是如此之强，以至于任何东西，甚至光都不能从该处逃逸出来。黑洞是看不见的。然而，量子力学的不确定性原理允许粒子和辐射从黑洞漏出来。

经典力学

定律的一个系统，其中每个物体都有确定的位置和速度。现在它已为量子力学所超越，在量子力学中物体不具有确定的位置和速度。

宇宙线

从太空来的高能物质粒子，它以接近于光速的速度运动。

宇宙学

对整个宇宙的研究。

电子

一种通常绕着原子核公转的基本粒子。它属于叫做轻子的低质量物质粒子族，它具有1个单位的负电荷。

基本粒子

不具有任何内部结构的粒子。它们可以归类于物质粒子和携带力的粒子两种范畴。

熵

一个系统的无序度的量度。按照热力学第二定律，它必须永远增加。

事件视界

黑洞的边界。一旦越过这个边界，就不可能从黑洞逃逸。

频率

对于一颗光子，这是和该光子相关联的电磁场的变化率。光子的频率越高则能量越大。

伽马射线

一种极高能量的光子，它可由核反应或在宇宙早期形成的低质量的“太初”黑洞发射出。典型的伽马射线的波长为0.0000000001米。

广义相对论

爱因斯坦的第二种相对性理论（1916年）。该理论认为引力是由空间—时间几何（也就是不仅考虑空间中的点之间，而是考虑在空间和时间中的点之间距离的几何）的畸变引起的，因而引力场影响时间和距离的测量。

霍金辐射

从黑洞的事件视界发射出来的基本粒子和辐射。黑洞越小，则霍金

辐射的量越大，而黑洞收缩得越快，随着黑洞最终蒸发并消失引起一个巨大的爆炸。

虚时间

方程式中的时间变量被当作虚数处理的思想。虚数是-1的平方根的倍数。

暴涨

被认为在极早期宇宙发生的加速膨胀的时期。

微波

波长大约为1厘米的辐射。

微波背景辐射

在宇宙的所有方向传播的电磁谱微波区域的辐射。这种背景辐射是由大爆炸引起的巨大的热量的残余，因此它被认为是该理论的一个证实。

中子

一种不带电荷的、通常可在原子核中找到的非基本粒子。它由被称为夸克的基本粒子构成。

中子星

一种非常致密的恒星，它的力强到足以使原子中的大部分电子和质子结合成中子。

无边界设想

空间和虚时间一起形成一个范围有限但是没有边界或边缘的曲面的设想。在这个设想中，空间—时间像是地球的表面，只不过多了两维而已。

光学望远镜

使用人眼可见光形成恒星和星系的像的望远镜。

光子

光的基本粒子或量子。

太初黑洞

在大爆炸后很短的时间内形成的黑洞。

质子

通常在原子核中找到的非基本粒子。它带有1个单位的正电荷。它由被称为夸克的基本粒子构成。

脉冲星

旋转中子星。当它的磁场和围绕的磁场相互作用时，就发射出射电波的脉冲。

量子引力

把量子力学和广义相对论结合在一起的理论。

量子力学

一种理论系统。其中粒子不具有准确定义的位置和速度，在许多方面的行为和波动类似，诸如光的波动在许多方面类似粒子。

类星体

和恒星类似的物体。被认为由一颗巨大的旋转黑洞和正在大量地降落上去的物质组成。在物质落到黑洞里面之前，会变得非常热并发射出大量能量。类星体极其遥远，但是由于它们的功率这样强大，因此仍然能被观测到。

射电望远镜

一种描绘出诸如类星体和射电星系的射电源在天空位置地图的望远镜。

射电波

电磁场的波动。和可见光波类似，但是具有长得多的、数量级为几米而不是几厘米的波长。

热力学第二定律

该定律说，宇宙中的无序度的量度或者熵随时间增加。它和其他定律的不同之处在于，它不总是真的，但几乎总是真的，它还依赖于宇宙从一个有序的状态起始。

奇点

空间—时间的具有无限曲率的一点，空间—时间在该处完结。经典广义相对论预言奇点将会发生，但由于理论在该处失效，所以不能描述在奇点处会发生什么。

空间—时间

相对论中的宇宙的四维描述。它把空间的三维和时间的一维统一在一起。在广义相对论中，弯曲的空间—时间被用来描述引力。

狭义相对论

爱因斯坦的第一种相对性理论（1905年）。该理论认为光总是以常速率运动，不管它在何处运动，其速率是一个绝对常数。这个理论把空间和时间统一成一个平坦的、四维的空间—时间，但是它没有描述引力的效应。

稳态理论

一种现在受到普遍怀疑的宇宙学理论。该理论认为在存在的星系之间的膨胀空间中新物质会产生出来。

热力学

物理学中有关热和能量的其他形式的分支。

不确定性原理

该原理陈述，人们永远不能同时精确得知一个粒子的位置和速度，越精确知道其中的一个，则越不精确知道另外的一个。

虚粒子

量子力学的不确定性原理允许宇宙中的能量于短暂时间内在固定的总数值左右起伏。起伏越大则时间越短。在这种能量起伏中产生的粒子称为虚粒子。当能量恢复时虚粒子湮灭。

波函数

描述在不同点找到一个粒子的概率的分布。

宇宙的波函数

描述在一定的时刻找到宇宙的不同形状的概率的分布。

白矮星

一种达到稳态的恒星，其质量没有大到使其引力足够强到引起向自身坍缩的程度。

[1]类星体是类似恒星、发射出巨大数量辐射的天体。它们在1963年被发现，并被认为是在宇宙开始，亦即150亿年前形成的。脉冲星被认为是旋转的中子星。中子星磁场的南北极不和旋转轴同向，这就引起了射电波的脉冲。脉冲星是1967年发现的。

[2]尼尔斯·玻尔（1895～1962）是丹麦物理学家，1922年获得诺贝尔奖。他是发展导致量子力学发现的原子论的主将。

[3]雅各布·伯肯斯坦是普林斯顿约翰·惠勒的研究生。他在以色列比尔谢巴的本格乌里恩大学教书多年，现在在耶路撒冷希伯莱大学的拉卡物理研究所工作。

[4]马丁·雷斯是史蒂芬·霍金的合作者，现在剑桥的天文研究所任职。

[5]约翰·泰勒是最初提出反对意见的科学家。

[6]在量子力学中虚粒子是永远无法直接探测得到的，但是它的存在具有可测量的效应。每一类型的物质粒子都有一种对应的反粒子。当一个粒子和它的反粒子碰撞时，它们会湮灭，只留下能量。

[7]天鹅座X—1是离地球6000光年远的一个星座。许多科学家相信它包含一个黑洞。在另一个只能在南半球看得见的星系——大麦哲伦星云中，人们相信存在另一个黑洞。

[8]太初黑洞是当宇宙非常年轻时产生的黑洞。

[9]CERN是欧洲核子研究中心，总部设在瑞士日内瓦附近。

第一推动丛书: 宇宙系列

The Cosmos Series

时空本性

The Nature of Space and Time

THE FIRST MOVER

[英] 史蒂芬·霍金
[英] 罗杰·彭罗斯 著
吴忠超 杜欣欣 译

Stephen Hawking
Roger Penrose



CTS HK 湖南科学技术出版社

版权信息

时空本性

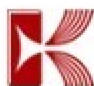
著者：[英]史蒂芬·霍金　[英]罗杰·彭罗斯

译者：吴忠超　杜欣欣

责任编辑：李永平　吴炜　戴涛　杨波

装帧设计：邵年　李叶　李星霖　赵宛青

ISBN：9787535794536



湖南科学技术出版社
HUNAN SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS

目录

版权信息
总序
再版序 一个坠落苹果的两面：极端智慧与极致想象
出版前言
译者序
前言
感谢
第1章 经典理论
第2章 时空奇性结构
第3章 量子黑洞
第4章 量子理论和时空
第5章 量子宇宙学
第6章 时空的扭量观点
第7章 辩论
参考文献

总序

《第一推动丛书》编委会

科学，特别是自然科学，最重要的目标之一，就是追寻科学本身的原动力，或曰追寻其第一推动。同时，科学的这种追求精神本身，又成为社会发展和人类进步的一种最基本的推动。

科学总是寻求发现和了解客观世界的新现象，研究和掌握新规律，总是在不懈地追求真理。科学是认真的、严谨的、实事求是的，同时，科学又是创造的。科学的最基本态度之一就是疑问，科学的最基本精神之一就是批判。

的确，科学活动，特别是自然科学活动，比起其他的人类活动来，其最基本特征就是不断进步。哪怕在其他方面倒退的时候，科学却总是进步着，即使是缓慢而艰难的进步。这表明，自然科学活动中包含着人类的最进步因素。

正是在这个意义上，科学堪称为人类进步的“第一推动”。

科学教育，特别是自然科学的教育，是提高人们素质的重要因素，是现代教育的一个核心。科学教育不仅使人获得生活和工作所需的知识和技能，更重要的是使人获得科学思想、科学精神、科学态度以及科学方法的熏陶和培养，使人获得非生物本能的智慧，获得非与生俱来的灵魂。可以这样说，没有科学的“教育”，只是培养信仰，而不是教育。没有受过科学教育的人，只能称为受过训练，而非受过教育。

正是在这个意义上，科学堪称为使人进化为现代人的“第一推动”。

近百年来，无数仁人志士意识到，强国富民再造中国离不开科学技术，他们为摆脱愚昧与无知做了艰苦卓绝的奋斗。中国的科学先贤们代代相传，不遗余力地为中国的进步献身于科学启蒙运动，以图完成国人的强国梦。然而可以说，这个目标远未达到。今日的中国需要新的科学启蒙，需要现代科学教育。只有全社会的人具备较高的科学素质，以科

学的精神和思想、科学的态度和方法作为探讨和解决各类问题的共同基础和出发点，社会才能更好地向前发展和进步。因此，中国的进步离不开科学，是毋庸置疑的。

正是在这个意义上，似乎可以说，科学已被公认是中国进步所必不可少的推动。

然而，这并不意味着，科学的精神也同样地被公认和接受。虽然，科学已渗透到社会的各个领域和层面，科学的价值和地位也更高了，但是，毋庸讳言，在一定的范围内或某些特定时候，人们只是承认“科学是有用的”，只停留在对科学所带来的结果的接受和承认，而不是对科学的原动力——科学的精神的接受和承认。此种现象的存在也是不能忽视的。

科学的精神之一，是它自身就是自身的“第一推动”。也就是说，科学活动在原则上不隶属于服务于神学，不隶属于服务于儒学，科学活动在原则上也不隶属于服务于任何哲学。科学是超越宗教差别的，超越民族差别的，超越党派差别的，超越文化和地域差别的，科学是普适的、独立的，它自身就是自身的主宰。

湖南科学技术出版社精选了一批关于科学思想和科学精神的世界名著，请有关学者译成中文出版，其目的就是为了传播科学精神和科学思想，特别是自然科学的精神和思想，从而起到倡导科学精神，推动科技发展，对全民进行新的科学启蒙和科学教育的作用，为中国的进步做一点推动。丛书定名为“第一推动”，当然并非说其中每一册都是第一推动，但是可以肯定，蕴含在每一册中的科学的内容、观点、思想和精神，都会使你或多或少地更接近第一推动，或多或少地发现自身如何成为自身的主宰。

再版序　一个坠落苹果的两面：极端智慧与极致想象

龚曙光

2017年9月8日凌晨于抱朴庐

连我们自己也很惊讶，《第一推动丛书》已经出了25年。

或许，因为全神贯注于每一本书的编辑和出版细节，反倒忽视了这套丛书的出版历程，忽视了自己头上的黑发渐染霜雪，忽视了团队编辑的老退新替，忽视好些早年的读者已经成长为多个领域的栋梁。

对于一套丛书的出版而言，25年的确是一段不短的历程；对于科学研究的进程而言，四分之一个世纪更是一部跨越式的历史。古人“洞中方七日，世上已千秋”的时间感，用来形容人类科学探求的速律，倒也恰当和准确。回头看看我们逐年出版的这些科普著作，许多当年的假设已经被证实，也有一些结论被证伪；许多当年的理论已经被孵化，也有一些发明被淘汰……

无论这些著作阐释的学科和学说属于以上所说的哪种状况，都本质地呈现了科学探索的旨趣与真相：科学永远是一个求真的过程，所谓的真理，都只是这一过程中的阶段性成果。论证被想象讪笑，结论被假设挑衅，人类以其最优越的物种秉赋——智慧，让锐利无比的理性之刃，和绚烂无比的想象之花相克相生，相否相成。在形形色色的生活中，似乎没有哪一个领域如同科学探索一样，既是一次次伟大的理性历险，又是一次次极致的感性审美。科学家们穷其毕生所奉献的，不仅仅是我们无法发现的科学结论，还是我们无法展开的绚丽想象。在我们难以感知的极小与极大世界中，没有他们记历这些伟大历险和极致审美的科普著作，我们不但永远无法洞悉我们赖以生存世界的各种奥秘，无法领略我们难以抵达世界的各种美丽，更无法认知人类在找到真理和遭遇美景时的心路历程。在这个意义上，科普是人类极端智慧和极致审美的结晶，是物种独有的精神文本，是人类任何其他创造——神学、哲学、文学和

艺术无法替代的文明载体。

在神学家给出“我是谁”的结论后，整个人类，不仅仅是科学家，包括庸常生活中的我们，都企图突破宗教教义的铁窗，自由探求世界的本质。于是，时间、物质和本源，成为了人类共同的终极探寻之地，成为了人类突破慵懒、挣脱琐碎、拒绝因袭的历险之旅。这一旅程中，引领着我们艰难而快乐前行的，是那一代又一代最伟大的科学家。他们是极端的智者和极致的幻想家，是真理的先知和审美的天使。

我曾有幸采访《时间简史》的作者史蒂芬·霍金，他痛苦地斜躺在轮椅上，用特制的语音器和我交谈。聆听着由他按击出的极其单调的金属般的音符，我确信，那个只留下萎缩的躯干和游丝一般生命气息的智者就是先知，就是上帝遣派给人类的孤独使者。倘若不是亲眼所见，你根本无法相信，那些深奥到极致而又浅白到极致，简练到极致而又美丽到极致的天书，竟是他蜷缩在轮椅上，用唯一能够动弹的手指，一个语音一个语音按击出来的。如果不是为了引导人类，你想象不出他人生此行还能有其他的目的。

无怪《时间简史》如此畅销！自出版始，每年都在中文图书的畅销榜上。其实何止《时间简史》，霍金的其他著作，《第一推动丛书》所遴选的其他作者著作，25年来都在热销。据此我们相信，这些著作不仅属于某一代人，甚至不仅属于20世纪。只要人类仍在为时间、物质乃至本源的命题所困扰，只要人类仍在为求真与审美的本能所驱动，丛书中的著作，便是永不过时的启蒙读本，永不熄灭的引领之光。虽然著作中的某些假说会被否定，某些理论会被超越，但科学家们探求真理的精神，思考宇宙的智慧，感悟时空的审美，必将与日月同辉，成为人类进化中永不腐朽的历史界碑。

因而在25年这一时间节点上，我们合集再版这套丛书，便不只是为了纪念出版行为本身，更多的则是为了彰显这些著作的不朽，为了向新的时代和新的读者告白：21世纪不仅需要科学的功利，而且需要科学的审美。

当然，我们深知，并非所有的发现都为人类带来福祉，并非所有的创造都为世界带来安宁。在科学仍在为政治集团和经济集团所利用，甚至垄断的时代，初衷与结果悖反、无辜与有罪并存的科学公案屡见不鲜。对于科学可能带来的负能量，只能由了解科技的公民用群体的意愿

抑制和抵消：选择推进人类进化的科学方向，选择造福人类生存的科学发现，是每个现代公民对自己，也是对物种应当肩负的一份责任、应该表达的一种诉求！在这一理解上，我们将科普阅读不仅视为一种个人爱好，而且视为一种公共使命！

牛顿站在苹果树下，在苹果坠落的那一刹那，他的顿悟一定不只包含了对于地心引力的推断，而且包含了对于苹果与地球、地球与行星、行星与未知宇宙奇妙关系的想象。我相信，那不仅仅是一次枯燥之极的理性推演，而且是一次瑰丽之极的感性审美……

如果说，求真与审美，是这套丛书难以评估的价值，那么，极端的智慧与极致的想象，则是这套丛书无法穷尽的魅力！

出版前言

爱因斯坦说过关于宇宙的最不可理解的事是它是可理解的。他是正确的吗？量子场论和爱因斯坦的广义相对论，这两种在整个物理学中最精确和成功的理论能被统一在单独的量子引力中吗？关于这个问题，世界上两位最著名的物理学家——史蒂芬·霍金（《时间简史》的作者）和罗杰·彭罗斯（《皇帝新脑》《精神的影子（*Shadows of Mind*）》的作者）——持不同意见。在这部基于六次讲演和最后辩论的著作中，他们阐述了各自的立场。这些讲演是在剑桥大学的伊萨克·牛顿数学科学研究所进行的。

量子引力能够解释大爆炸的更早时刻以及像黑洞这样令人迷惑的物体的物理，那么，如何建立量子引力呢？为什么在我们的宇宙这一块，正像爱因斯坦所预言的，看不到量子效应？奇异的量子过程如何使黑洞蒸发，它们所吞没的所有信息到哪儿去了？时间为何往前进，而不往后退？

这两位对手在本书中触及所有这些问题。彭罗斯，正像爱因斯坦那样，拒绝把量子力学接受为最终理论。霍金的想法不同，他论断道，广义相对论不能简单地解释宇宙的开端。只有量子引力和无边界假设相结合才有望解释我们对宇宙的观测。和霍金的实证主义立场不同，彭罗斯采取了实在主义立场。他认为宇宙是开放的，并将永远膨胀。他论断道，按照光锥几何，时空的压缩和变形以及利用扭量理论，可以理解宇宙。读者在最后的辩论中可以看到，霍金和彭罗斯对寻求最终统一量子力学和相对论的意见如何不同以及在理解这种不可理解的东西方面，他们所进行的不同努力。

译者序

杜欣欣　吴忠超

1996年8月15日

于冈多佛堡

今年夏天，译者第三次应邀到梵蒂冈天文台访问。夜里和天文学家们一道观赏奇妙的宇宙天体，日间则遨游于抽象的时空理论之中。这本译作便是这个月的结果。

天文台位于罗马东南远郊的冈多佛堡，它俯瞰着一片翡翠般的火山湖，环湖逶迤的山岭间遍布森林、花园和别墅。此处之所以闻名于世，是因为它是教皇夏宫的所在地。天文台和它的望远镜耸立在夏宫的最高层，译者办公室的下一层即是教皇的卧室。礼拜日中午教皇主持的弥撒更使这个旅游和宗教胜地充满了来自世界各地的教徒。

此地对于本书另有一层历史渊源。1981年本书作者之一霍金应教廷科学院之邀，在宇宙论会议上首次发表了无边界宇宙的思想。会议之后，教皇在冈多佛堡接见与会者。按照西方的传统，教徒在这个场合必须在教皇前行跪礼。但是当霍金驱动其轮椅来到教皇之前时，历史上奇异的一幕出现了，教皇离开其座位并跪下，使他便于脸对脸和霍金会晤。这使得四周的教徒们目瞪口呆，且不说霍金自己所深爱的无边界宇宙理论正是无神论的彻底体现。

宗教作为文化的一种载体，与科学之间的恩恩怨怨不是三言两语能道得尽的。布鲁诺和伽利略受到的迫害是众所周知的。事实上，1633年正是在这个宫殿里，当时的教皇乌尔班八世签署了谴责伽利略的文件。1979年11月10日正值爱因斯坦百年诞辰，当今教皇约翰·保罗二世发表文告宣布伽利略是正确的，并组织编撰有关伽利略的著作，他还深情地提及，爱因斯坦生前荣耀，而伽利略却备受磨难。的确也是，三百多年后的今天，这对伽利略还有什么意义呢？值得注意的是，他并没有公开承认教会犯了错误。当然教会和科学也并非总是对立的，利玛窦由于对

东西方文化交流的贡献而名留史册，这在他12年前和译者的一次交谈中还着意强调过。

从布鲁诺在罗马鲜花广场受火刑，到伽利略得到平反，世界文明无论如何是进步了。现在人们可以从容地创造和欣赏科学理论，而不必担心遭受到和伽利略一样的命运。在科学史上，伽利略在西方第一次提出了经典的相对论原理，而他在比萨斜塔上进行的自由落体实验的意义，直到三百年后才由爱因斯坦的广义相对论所充分阐明。本书阐述的正是相对论、宇宙论和时空论的最前沿知识。霍金和彭罗斯的理论如此美丽，简直可当成艺术品来鉴赏。当我们沉湎在他们的体系中时，就会和仰望星空一样，惊叹造化的神奇。当然这些理论还不是完备的，有些论题，尤其是时间箭头等还远未臻于澄明境界，读者阅赏此书之际，定会所见略同。

写到此刻，已近午夜。临湖酒吧歌声早已沉寂，窗外星空依然灿烂。在此时空边缘的“仙凡界”俯仰古今，缅怀先贤，不禁感慨系之。

前言

迈克尔·阿蒂雅

1994年在剑桥大学的伊萨克·牛顿数学科学研究所进行了一项为期6个月的计划，本书所记载的在罗杰·彭罗斯和史蒂芬·霍金之间进行的一场辩论是该计划的高潮。它描述了一场有关宇宙本性的某些最基本的观念的严肃的讨论。不用说，我们还未到达尽头，处处充满了不确定性和争议，还有许多可供论争的。

60多年前，关于量子力学的基础，在尼尔斯·玻尔和阿尔伯特·爱因斯坦之间进行了一场著名的旷日持久的辩论。爱因斯坦拒绝把量子力学接受为终极理论。他发现，它在哲学上是不充足的，他对以玻尔为代表的哥本哈根学派的正统解释发动了一场猛烈的战争。

在某种意义上，彭罗斯和霍金之间的辩论可以视作早期那场论争的继续，在这里彭罗斯担任爱因斯坦的角色，而霍金担任玻尔的角色。尽管问题变得更为复杂，也更为广泛，但是正如过去那样，技巧的论证和哲学的观点相互纠缠，无法分开。

量子理论，或者它的更高级的形式量子场论，现在已被高度发展，在技巧方面已经十分成功，尽管还存在像罗杰·彭罗斯这样的在哲学上持怀疑态度者。广义相对论，也就是爱因斯坦的引力论，也同样经历了时间的考验，并取得了举世瞩目的成功，虽然还遗留有关奇性或者黑洞的严重问题。

主导霍金—彭罗斯讨论的真正关键在于把这两种成功的理论结合在一起，并产生一种“量子引力”的理论。这里牵涉到许多高深的概念和技术问题，这便是这些讲演中探讨的范围。

本书所涉及的基本问题，包含诸如“时间箭头”，宇宙诞生处的初始条件以及黑洞吞没信息的方式。霍金和彭罗斯在有关所有这些以及许多其他的问题上都非常微妙地采取了不同的立场。不管在数学上还是在物理上他们都认真地表述自己的看法，其争论的形式使富有意义的相互批

评得以实现。

虽然有些讲演需要读者具备数理知识的背景，但是许多论证是在使更广大读者感兴趣的更高深的水平上进行的。读者至少对于所讨论的观念的广阔和精微，以及对于寻找一种包括引力论和量子论在内的宇宙和谐图像的伟大挑战能获知梗概。

感谢

作者、出版者以及伊萨克·牛顿数学科学研究所感谢以下在准备这些讲演和编写本书时惠予帮助的人士，他们是马提亚斯·R.嘉柏迪尔，赛蒙·基尔，约纳逊·B.罗杰斯，丹尼尔·R.D.史可特以及保罗·A.莎。

第1章　经典理论

史蒂芬·霍金

罗杰·彭罗斯和我将在这些讲演中发表我们关于时空本性的相关的但是相当不同的观点。我们将交替讲演，每人讲三次，最后是有关我们不同方法的讨论。我应当在此强调，这些讲演是相当技术性的。假定听者具有广义相对论和量子理论的基本知识。

里查德·费因曼写过一篇短文，描述他参加广义相对论会议的经验。我想那是1962年在华沙召开的会议。他对与会者的能力以及文不对题非常瞧不起。此后不久广义相对论的声望扶摇而上，并引起广泛兴趣，这应大大地归功于罗杰的研究贡献。在此之前，广义相对论被表达成在单独坐标系统下的一堆繁复的偏微分方程。人们在找到一种解后即欢欣鼓舞，根本不在乎其是否在物理学上有意义。然而，罗杰引出了诸如旋量和全局方法的现代概念。他首先指出，不必准确地解方程，即能发现一般性质。正是他的第一道奇性定理引导我去研究因果性结构并刺激我有关奇性和黑洞的经典研究的灵感。

我认为罗杰和我在经典工作方面的观点相当一致。然而，我们在量子引力，或者毋宁说量子理论本身的研究上分道扬镳。虽然我因为提出过量子相干性丧失的可能性，而被粒子物理学家们认定为危险的激进主义者，但和罗杰相比，肯定只能算作保守主义者。我采取实证主义的观点，物理理论只不过是一种数学模型，询问它是否和实在相对应是毫无意义的。人们所能寻求的是其预言应与观察的一致。我以为罗杰内心自认为是位柏拉图主义者，这要由他自己承认才算。

虽然有人提出，时空可以有分立结构，我看不出有任何理由应当抛弃连续的理论，因为它曾经是这样的成功。广义相对论是一项漂亮的理论，它和迄今进行的所有观察都符合。它也许在普朗克尺度下需要修正，但是我认为这不会影响由它做出的许多预言。它也许只不过是某种更基本理论的低能近似，比如说弦理论，但是我认为弦理论被过分兜售。首先，人们不清楚，广义相对论和超引力中的其他各种场相结合时，是否能给出有意义的量子理论。关于超引力死亡的报道极尽夸张之能事。第一年所有人都相信超引力是有限的。下一年时尚变更，所有人

又都说超引力肯定有发散，虽然迄今没有人真正找到这种发散。我不讨论弦理论的第二种原因是，弦理论没有做过任何可以检验的预言。与此成鲜明对比的是，我将要讲到的，量子理论广义相对论的直接应用已经做出了两项可以检验的预言，其中的一项预言是，在暴涨期的小微扰的发展似乎已为最近观察到的微波背景的起伏所证实；另一项预言，黑洞应当热辐射，在原则上是可以检验的。我们所要做的一切是去发现太初黑洞。可惜的是，周围似乎没有很多。如果有的话，我们就知道如何量子化引力。

甚至如果弦理论真的是自然的终极理论，那么这些预言也没有一个要被改变。但是弦理论，至少在它目前的发展阶段上，除了声称广义相对论为它的低能有效理论外，根本做不出这些预言。我怀疑这种情形将会一成不变，弦理论也许永远做不出广义相对论或者超引力所做不出的预言。如果果真如此，人们就怀疑，弦理论是否为一种真正的科学理论。没有特别的可以在观测上检验的预言，光是数学上的漂亮和完备是否就已经足够了？况且，现阶段弦理论既不漂亮也不完备。

由于这些原因，我将在这些讲演中讨论广义相对论。我将集中于两个领域，在这两个领域引力似乎引起和其他场论完全不同的特点。第一个是引力使时空具有一个开端也许还具有一个终点的观念。第二个是似乎存在不同于粗粒化产生的内禀的引力熵的发现。某些人声称，这些预言不过是半经典近似的人为的产物。他们说，弦理论也就是真正的量子引力论，将会抹平这种奇性并对黑洞辐射引进相干性，因此在粗粒化含义上它只不过是近似热性的。如果情形果真如此，则是相当无趣的。引力就和其他场相类似。但是，我相信，它是显著不同的，因为它自己形成供自己表演的舞台，而不像其他的场一样，只不过是在固定的时空背景中表演。也正因为如此才导致时间具有开端的可能性。它还导致宇宙中观测不到的区域所引出的我们无法度量的引力熵的概念。

我在这次讲演中回顾经典广义相对论中导致这些观念的工作。我在第二次和第三次讲演（第3章和第5章）中将指出，进入量子理论后，它们将如何被改变被推广。我的第二次讲演是关于黑洞的，而第三次是关于量子宇宙学。

罗杰为研究奇性和黑洞引进了关键的技巧，我也助他一臂之力，这就是时空大尺度因果性结构的学问。$\mathcal{I}^{+}(p)$被定义为时空M的纵点p可用未来指向的类时曲线到达所有点的集合（见图1.1）。人们可把$\mathcal{I}^{+}(p)$认为是

所有会被在p处发生之事件所影响的事件的集合。另一类似的定义是把加号换成负号，未来换成过去。我把这种定义认为是自明的。

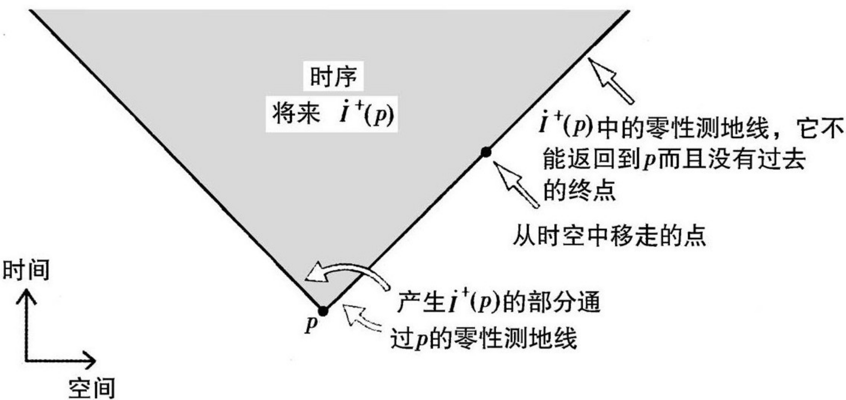
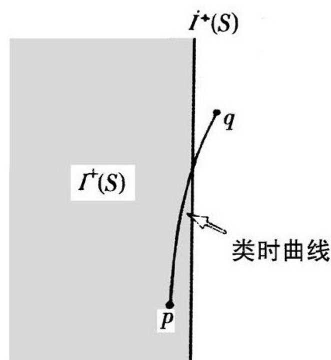


图1.1　点p的时序将来

我们现在考虑一个集合S的未来的边界$\mathcal{I}^{+}(S)$。可以相当容易看出，这个世界不能是类时的。因为在这种情形下，一个恰好在边界之外的点可以是一个恰好在里面的点p的未来。未来的边界也不能是类空的，除了刚好在集S上的除外，因为在那处情形下，从刚好在边界未来出发的每一根过去指向的曲线都会穿越过边界并且离开S的未来，这就和q是在S未来中的事实相冲突（图1.2）。

所以人们可以得到结论，除了集S本身之外未来边界是零性的。更精确地说，如果q是在该未来的边界但是不在S的闭包上，则存在一根通过q并落在边界上的过去指向的零性测地线段（见图1.3）。也可能存在不止一根通过q的落在边界上的零性测地线段，但是在那种情形下，q将是该线段的未来端点。换句话说，S的未来的边界是由这种零性测地线生成的，这种零性测地线在边界上有未来端点，如果它们和其他的生成元相交的话将要进入未来的内部。另一方面，该测地线只能在S上才有过去端点。然而，存在这样的时空，其中一个集合S的未来的边界的生成元永远不和S相交。这种生成元不能有过去端点。



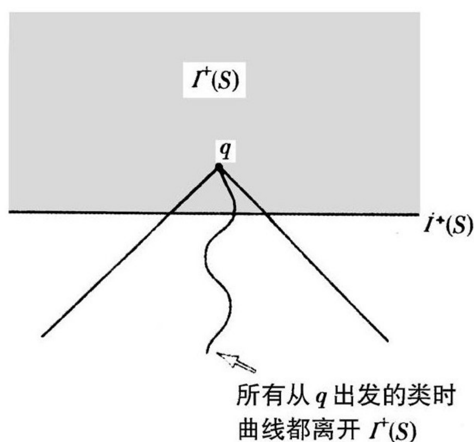


图1.2　时序将来的边界既不能是类时的也不能是类空的

一个简单的例子是在闵可夫斯基空间中把一根水平线段移走（见图1.4）。如果集S落在这根水平线的过去，该线就会投下一个阴影，并且存在刚好在该线将来的点，这些点不在S的未来。存在S的未来的边界的一根生成元，它返回到该水平线的端点上。然而，因为水平线的端点已从时空中移走，这根边界的生成元就没有过去的终点。这个时空是不完整的，但是人们把在水平线端点附近的度规乘上一个适当的共形因子，就可以挽救它。尽管类似这样的空间是非常人为的，但是，在提醒你在研究因果性结构时必须谨慎方面，这些例子十分重要。事实上，罗杰·彭罗斯在担任我的一位博士论文考官时指出，一个类似我刚才描述的空间，正是我在论文中做的某些断言的反例。

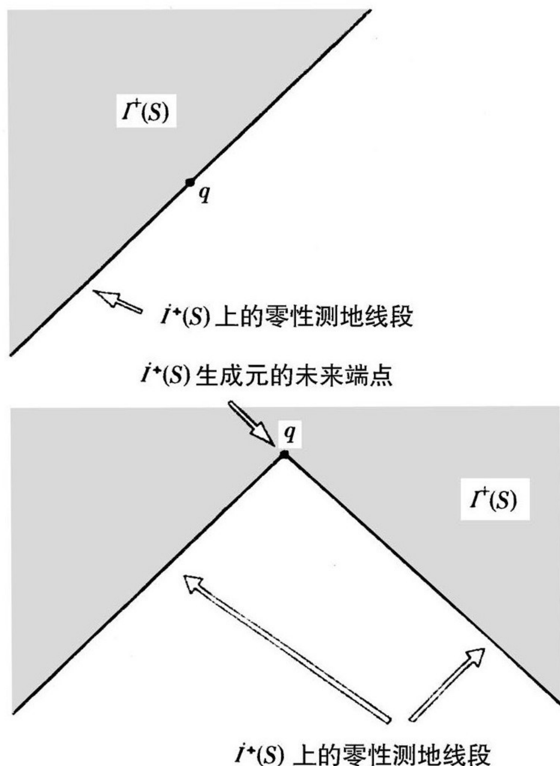


图1.3　上：点q落在未来边界上，所以在边界上通过q存在一根零性测地线下：如果存在不止一根这种线段，则点q将是它们的未来端点

为了指出未来的边界的生成元具有在该集上的一个过去端点，人们必须在因果性结构上附加某种全局的条件。最强的也是物理上最重要的条件便是全局双曲性。一个开集U如果满足如下条件，便被称为全局双曲的：

1.在U中的任何一对点p和q，p的未来和q的过去的交集具有紧致的闭包。换言之，它是一个有界的金刚石形状的区域（图1.5）。

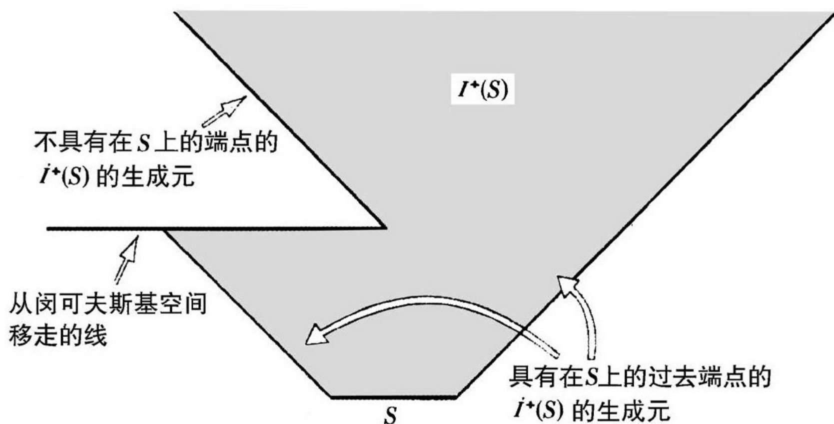


图1.4　由于从闵可夫斯基空间移走了一根线，集S的未来的边界具有一根没有过去端点的生成元

2.在U上强因果性成立。也就是说，在U中不包含闭合的或者几乎闭合的类时曲线。

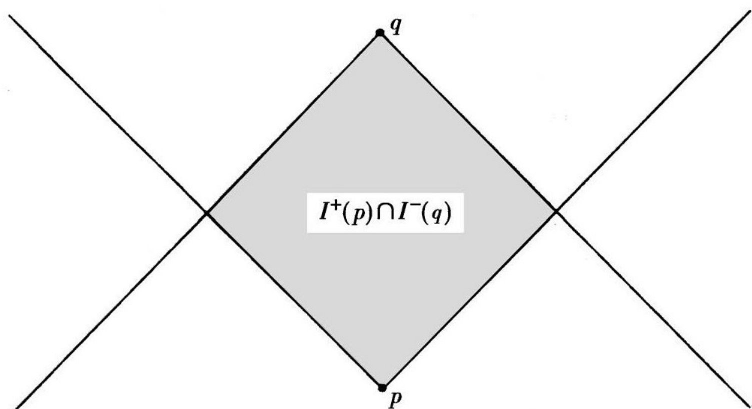


图1.5　p过去和q未来交集具有紧致的闭包

可以从以下事实看到全局双曲性的物理意义，对于U存在一族柯西面Σ（t）（见图1.6）。U的一个柯西面是和U中的每一根类时曲线相交一次并仅仅一次的类空的或零性的曲面。人们从柯西面上的数据可以预言在U所要发生的事件，而且人们在一个全局双曲的背景下可以表述行为良好的量子场论。人们在一个非全局双曲的背景下能否表述一种有意义的量子场论，这一点尚未清楚。这样全局双曲性也许在物理上是必须的。但是，我的观点是我们不应这么假想，因为这样做也许会排除掉引力要告诉我们的某种东西。我们宁愿从其他物理上合理的假设推导出时空的某些区域是全局双曲的。

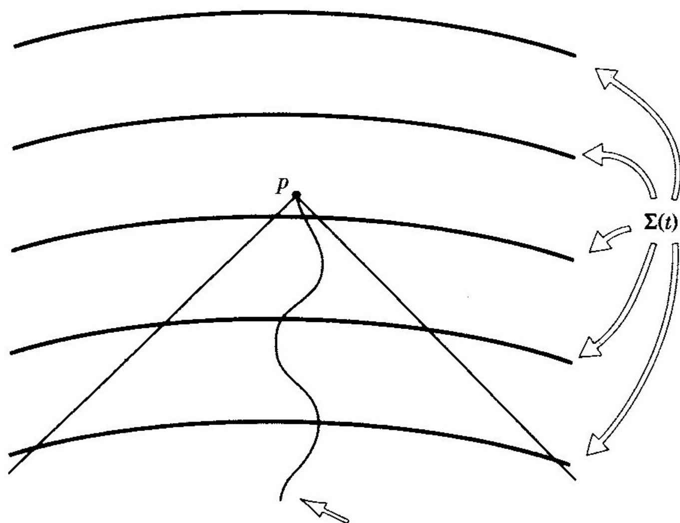


图1.6　U的一族柯西面

由下面的论证可以得知全局双曲性对奇性定理的意义。设想U是全局双曲的，p和q为U中的可被类时或零性曲线连接起来的两点。那么，在p和q之间存在一根类时的或零性的测地线，它的长度在所有从p到q的类时或零性曲线中取极大值（图1.7）。证明的方法是指出，所有从p到q的类时或零性曲线的空间在一定的拓扑下是紧致的。然后再指出在这个空间中曲线的长度是上端半连续的函数。所以，它必须到达其极大值，而且其极大长度的曲线将是一根测地线，否则的话，一个小变分就会给出更长的曲线。

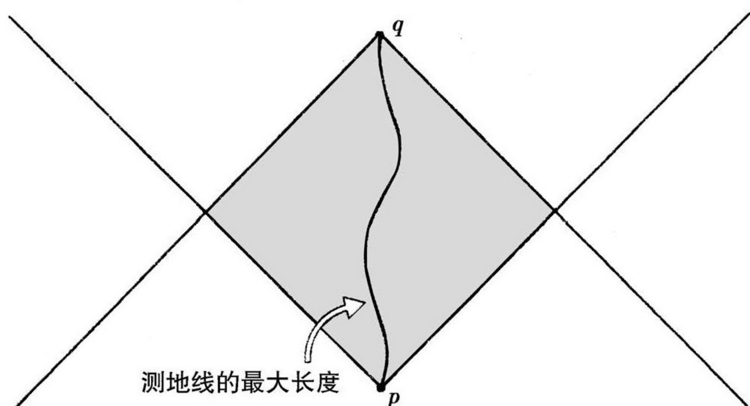


图1.7　在全局双曲空间中，存在一根测地线，它的长度在所有两点的类时或零性曲线中取极大值

现在人们可以考虑测地线γ长度的第二阶变分。可以指出，如果存在一根无限邻近的从p出发的测地线，它在p和q之间的一点r处和γ相交，则点r就被称作和p共轭（图1.8）。人们可以用地球表面上的两点p和q来阐述它。人们能不失一般性地把北极当作p点。因为地球具有正定的度规，而非洛伦兹度规，因此存在极小长度的测地线，而非极大长度的测地线。这根极小测地线是从北极跑到点q的一根经线。但是从p到q还存在另一根测地线，它从北极在背后跑到南极再回到q。这根测地线包含有南极这一点作为p的共轭点，所有从北极出发的测地线都在南极相交。在小变分的情形下两根从p到q的测地线都是长度的稳定点。但是在现在正定度规的情形下，一根包含有共轭点的测地线的二阶变分能给出从p到q的更短的曲线。这样，在地球的例子中，我们推导出，从后面下来到南极再返上来的那根测地线，不是从p到q的最短的曲线。这个例子是非常显明的。然而，在时空的情形，人们应指出在某种假定下，应当存在一个全局双曲的区域，在该区域中两点之间的每一根测地线上应当存在共轭点。这就导致一个冲突，它表明被当作非奇性时空定义的测地线完整性的假设是错误的。

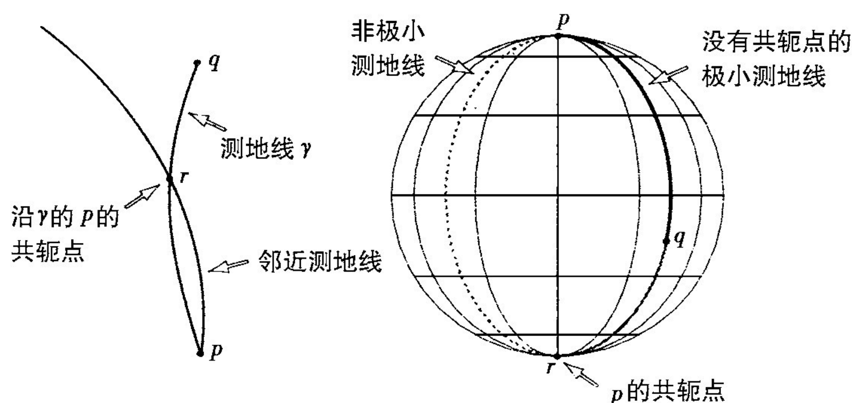


图1.8　左：如果在测地线上的p和q之间存在有共轭点r，它就不是具有极小长度的测地线。右：从p到q的非极小测地线在其南极具有共轭点

人们在时空中得到共轭点的原因是，引力是吸引力。所以它以这样的方式使时空弯曲，邻近的测地线向相互方向弯折而不是离开。人们从雷乔德符里或纽曼—彭罗斯方程可以看到这一点，我以统一的方式将这方程写在下面

雷乔德符里—纽曼—彭罗斯方程

$$\frac{\mathrm{d}\rho}{\mathrm{d}\nu}=\rho^{2}+\sigma^{ij}\sigma_{ij}+\frac{1}{n}R_{ab}l^{a}l^{b}$$

此处

n＝2适用于零性测地线，

n＝3适用于类时测地线。

此处ν是沿着一簇测地线的仿射参量，其切矢量l^a是超面正交的。量ρ是测地线平均收敛率，σ是切变的测度。项$R_{ab}l^al^b$是物质对测地线收敛的直接引力效应。

爱因斯坦方程

$$R_{ab}-\frac{1}{2}g_{ab}R=8\pi T_{ab}$$

弱能量条件

$$T_{ab}\nu^a\nu^b\geq 0$$

对任何类时矢量ν^a成立。

按照爱因斯坦方程，如果物质服从所谓的弱能量条件，则对于任何零性矢量l^a，这一项将是非负的。这是说，能量密度T_{00}在任何坐标系中都是非负的。任何合理的物质，比如讲标量场或者电磁场或者具有合理状态方程的流体的经典能量动量张量都符合弱能量条件。然而，能量动量张量的量子力学平均值可能局部地违反这个条件。这会在我的第二次和第三次讲演（第3章和第5章）中涉及。

假设弱能量条件成立，而且从点p出发的零性测地线开始再次收敛，还有ρ在那儿具有正值ρ_0，那么，纽曼—彭罗斯方程意味着，收敛率ρ会在仿射参数距离$\frac{1}{\rho_0}$之内的一点q处变成无穷大，如果零性测地线能延展到那么远的话。

如果在$\nu=\nu_0$处$\rho=\rho_0$，那么$\rho\geqslant\frac{1}{\rho^{-1}+\nu_0-\nu}$，这样，在$\nu=v_0+\rho^{-1}_0$之前应存在一个共轭点。

从p出发的无限邻近的测地线将在q处相交。这表明沿着连接它们的

零性测地线点q和p相共轭。对于在比点q更远的γ上的点，由γ的变分可得到从ρ出发的一根类时曲线。这样在比共轭点q更远处，γ不能落在ρ的未来的边界上，因此作为ρ的未来的边界的一个生成元γ将有一个未来的端点（图1.9）。

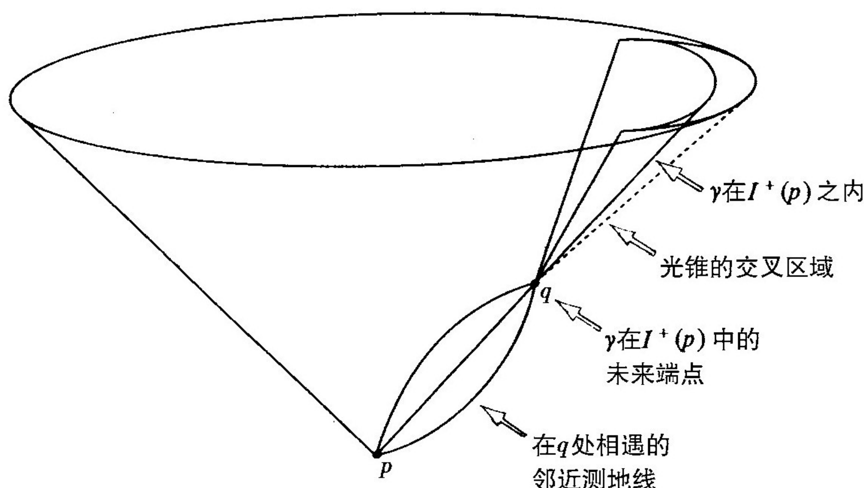


图1.9　沿着零性测地线点q和p相共轭，所以连接p和q的零性测地线将在q处离开p的未来的边界

类时测地线的情形很类似，除了强能量条件所要求的，对于任何类时矢量l^a，$R_{ab}l^al^b$必须非负。顾名思义，这个条件相当苛刻。然而，在经典理论中，至少在平均的意义上，它仍然在物理上是合理的。如果强能量条件成立，而且从p出发的类时测地线开始重新收敛，则存在一点q和p相共轭。

强能量条件

$$T_{ab}v^av^b \geqslant \frac{1}{2}v^av_aT$$

最后，存在一般能量条件。它首先说强能量条件成立。其次，每一根类时或零性测地线都会遭遇到某一点，在该处存在某种曲率，它不和测地线构成特定的配置方向。很多已知的准确解不能满足一般能量条件。人们可以预料，在适当的意义上的“一般的”解满足这个条件。如果一般能量条件成立，每根测地线将会遭遇到引力聚焦的一个区域。这就意味着如果测地线能在每个方向都延伸得足够远，则存在一对共轭点。

一般能量条件

1.强能量条件成立。

2.每根类时或零性测地线包含有一点，在那儿

$$l_{[a}R_{b]cd[e}l_{f]}\,l^{c}l^{d}\neq 0$$

人们通常会把时空奇性当作曲率变成无限大的一个区域。然而，把它当作定义的麻烦在于，人们可以除去奇点，而且声称所余下的流形是时空整体。所以，把时空定义成度规适当光滑的最大的流形更好。然后人们可以由存在不能被延伸到仿射参量无限值的非完整测地线的事实，来认证奇性的发生。

奇性定义

如果一个时空是类时或零性测地不完整而且不能被嵌入到一个更大的时空中，则它是奇性的。

这个定义反映了奇性的最令人讨厌的特点，即存在其历史在有限时间内具有开端或终结的粒子。可以找到在曲率保持有限时发生测地线不完整性的例子。但是一般地讲，沿着非完整测地线曲率会发散。如果人们要求助量子效应去解决在经典广义相对论中的奇性引起的问题，这一点是重要的。

彭罗斯和我在1965到1970年间利用我描述的技巧证明了一系列奇性定理。这些定理有三类条件。首先是诸如弱、强或一般能量条件的能量条件。然后是因果性结构上的某种全局条件，比如讲不应该有任何闭合类时曲线。最后，还有某种条件，那就是在某一区域引力是如此强大，以至于没有任何东西可以逃逸。

奇性定理

1.能量条件。

2.全局结构条件。

3.引力强到足以捕获一个区域。

第三个条件可以不同的方式来表达。一种方法是宇宙的空间截面是闭合的，这样就没有可以逃逸出去的外界区域。另一种方法是存在所谓

的闭合捕获面。这是一个闭合的二维面，不论是向内的还是向外的与其垂直的零性测地线都是收敛的（图1.10）。通常情况下，如果你在闵可夫斯基空间有一球形的二维面，向内的零性测地线是收敛的，但是向外的则是发散的。但是在恒星的坍缩中，引力场可能强到使光锥都朝里倾斜。这意味着甚至向外的零性测地线也是收敛的。

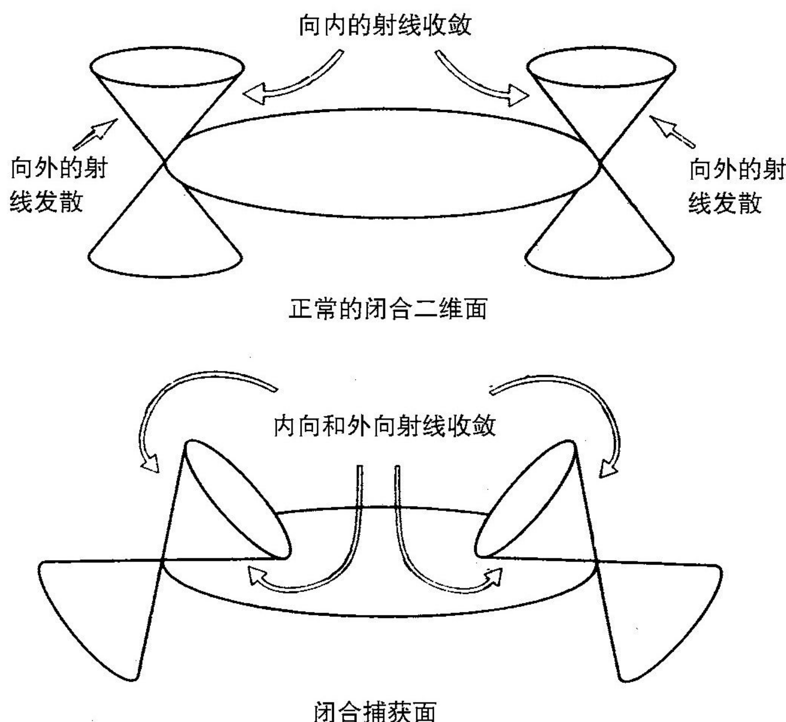


图1.10　在正常闭合面上，从该面出发的向外零性射线发散，而向内射线收敛。在闭合捕获面上，无论是向内还是向外的零性射线都收敛

各种奇性定理指出，如果这三类条件的不同组合成立，时空必须是类空或零性测地线不完整的。如果人们强化其中两个条件就能弱化第三个条件。我将在描述霍金—彭罗斯定理时阐明这一点。它要求一般能量条件，也就是三个能量条件中最强的。其全局条件相当弱，不应该存在闭合的类时曲线。而非逃逸条件是最一般的，即存在一个捕获面或者闭合的类空三维面。

为了简单起见，我只对一个闭合类空三维面S的情形概述其证明。人们可以把未来柯西发展D⁺（S）定义成点p的区域，从p点出发的每一根过去指向的类时曲线都与S相交（图1.11）。柯西发展便是能从S上的

数据预言的时空区域。现在假定未来发展是紧致的。这表明柯西发展具有未来边界H+（S），它称作柯西视界。利用类似于用在一个点的未来的边界的论证，可以得知，柯西视界是由没有过去端点的零性测地线生成的。然而，由于假定柯西发展是紧致的，其柯西视界也应是紧致的。这表明，该零性测地线将在一个紧致集中不断环绕。它们将趋近于一根极限的零性测地线λ，λ在柯西视界中不具有过去或者将来的端点（图1.12）。但是如果λ是测地线完整的，则一般能量条件将意味着它会包含一对共轭点p和q。λ上的在p和q以远的点可由类空曲线来连接。但是这会导致矛盾，因为柯西视界上的任何两点都不能是类时分隔的。所以或者λ不能是测地完整的，也就是定理已被证明，或者S的未来柯西发展不能是紧致的。

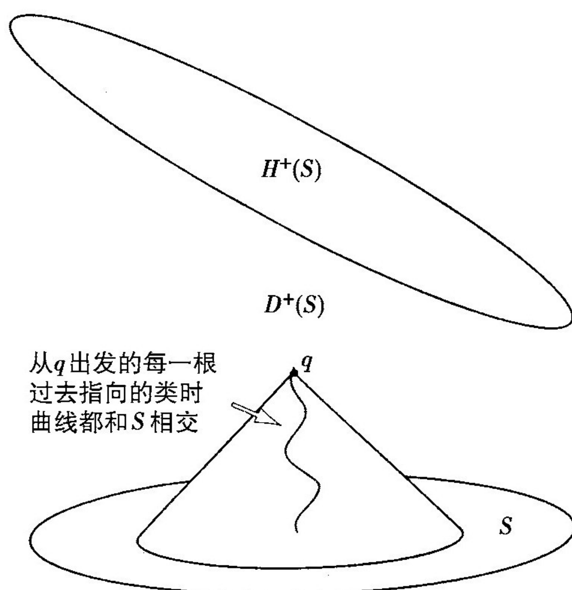


图1.11　集S的未来柯西发展以及它的未来边界，柯西视界H+（S）

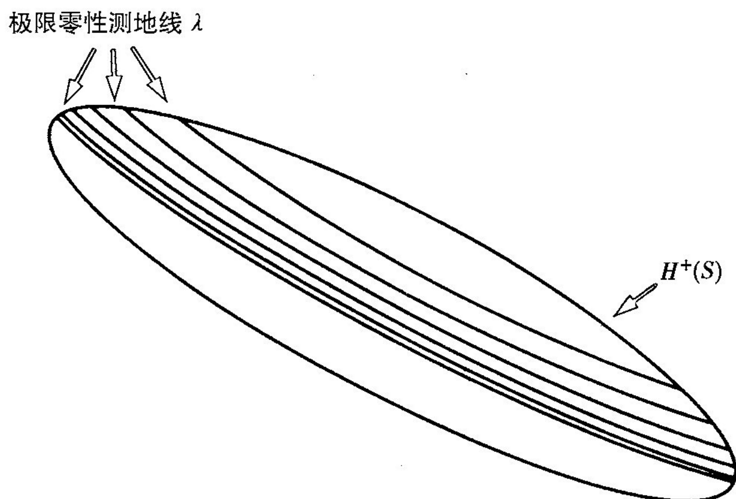


图1.12　在柯西视界上存在一根极限零性测地线λ，它在柯西视界上没有过去或未来端点

可以指出，在后一种情形下，存在一根从S出发的未来指向的类时曲线γ，它永远不会离开S的未来柯西发展。由相当类似的论证可以指出，γ可以向过去的方向延长成永远不会离开过去柯西发展D-（S）的曲线（图1.13）。现在考虑在γ上向过去排列的一串点x_n，以及向将来排列的类似一串点y_n。对于每一个n，点x_n和y_n都是类时相隔而且在S的全局双曲柯西发展之中。因此，存在从x_n到y_n的一根极大长度的类时测地线λ_n。所有λ_n都会穿越紧致的类空面S。这意味着，在柯西发展中存在一根类时测地线λ，λ是类时测地线λ_n的极限（图1.14）。要么λ是非完整的，这种情形下定理即被证明了，要么由于一般能量条件，它包含有共轭点。但是在那种情形，只要n足够大，λ_n就包含有共轭点。这就导致矛盾，因为λ_n被假定为具有极大长度的曲线。所以人们可以得出结论，时空是类时或零性测地线不完整的。换句话说，存在有奇性。

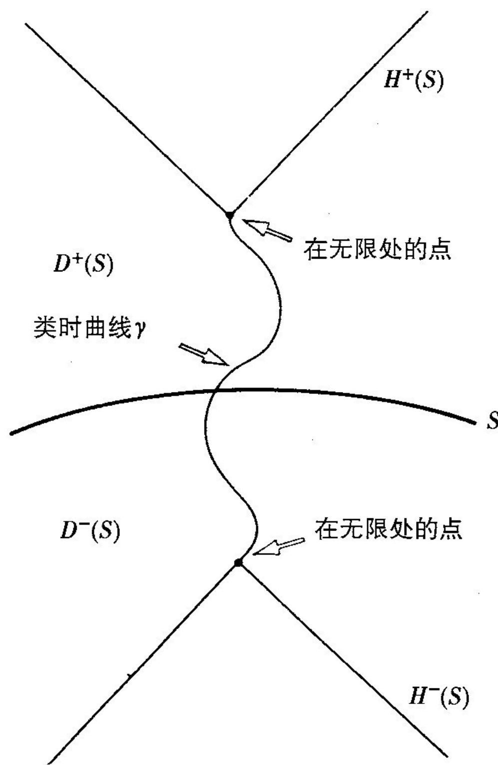


图1.13　如果未来（过去）柯西发展不是紧致的，则存在从S出发的未来（过去）指向的类时曲线，它永远不会离开未来（过去）柯西发展

这些定理在两种情形下预言奇性。第一种是在恒星和其他重质量物体的引力坍缩的未来。这些奇性便是时间的终点，至少对于沿着该不完整测地线上运动的粒子而言是这样的。预言奇性的另一种情形是在过去，在宇宙现在膨胀的开端。过去有些人（主要是俄国人）论断说，过去曾经有过收缩相，它以非奇性的形式反弹到膨胀阶段。在第二种情形所预言的奇性，使这些人放弃了他们的观点。现在几乎人人都相信，宇宙以及时间本身在大爆炸处有一开端。这个发现比发现各种非稳定的粒子重要得多了，但是它还没重要到能赢得诺贝尔奖的青睐。

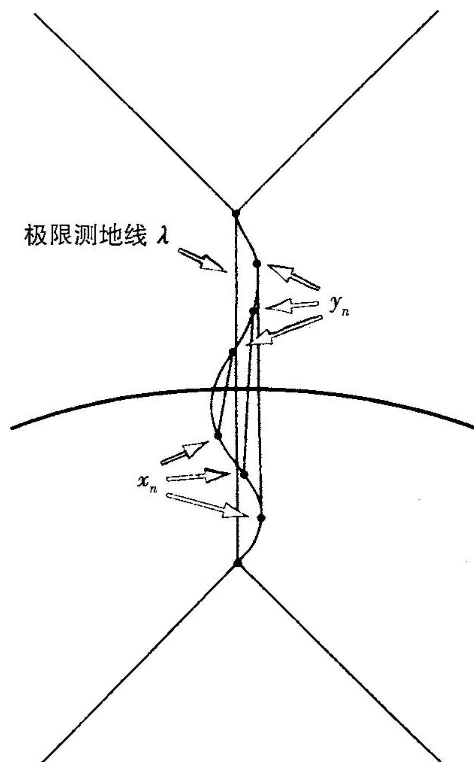


图1.14　作为γn极限的测地线λ必须是非完整的，因为否则的话它就包含有共轭点

奇性的预言意味着经典广义相对论不是一个完整的理论。因为奇点必须从时空流形中切割掉，所以人们不能在那儿定义场方程，也不能预料到从一个奇点会冒出什么东西来。鉴于存在过去的这一奇点，对付这一问题的唯一办法似乎是要借助于量子引力。

我将在第三次讲演再回到这上面来（第5章）。但是被预言在未来的奇性似乎具有彭罗斯称之为宇宙监督的性质。那是说，它们很轻易地在一些像在黑洞中躲开外界观察者的地方发生。这样，在这些奇点处可能发生的任何可预见性的失效都不会影响到外界世界所发生的，至少按照经典理论来说是这样的。

宇宙监督

自然憎恶裸奇点。

然而，正如我将在下一次讲演所要指出的，在量子理论中存在不可预见性。这是和引力场具有内禀熵有关，这种熵不是由粗粒化所引起

的。引力熵以及时间有一开端，也许还有个终结，是我讲演的两个主题，因为这是引力显著地区别于其他物理场的方式。

引力具有一个和熵行为类似的量的事实是首次在纯粹经典理论中注意到的。它依据于彭罗斯的宇宙监督猜测。这是未被证明的，但是人们相信，对于适度一般的初始数据以及状态方程，它是正确的。我要使用宇宙监督的弱形式。人们把围绕坍缩星的周围区域近似成渐近平坦的。那么，正如彭罗斯指出的，可以把该时空共形地嵌入到一个具有边界$\bar{M}$的流形中去（图1.15）。其边界∂M将为一个零性面，并且包括两个部分，即称作$\mathcal{I}^+$和$\mathcal{I}^-$的未来和过去零性无穷。如果两个条件满足的话，则我就说弱宇宙监督成立。首先，假定$\mathcal{I}^-$的零性测地线生成元是在一定共形的度规中完整的。这就意味着，远离坍缩的观察者能活得足够老，而不被从坍缩星发出的霹雳奇性所摧毁。其次是假设，$\mathcal{I}^+$的过去是全局双曲的。这表明没有从大距离能看到的裸奇性。在彭罗斯的更强的宇宙监督中假设整个时空是全局双曲的，但是弱形式对我的目的已经足够。

弱宇宙监督

1. $\mathcal{I}^+$和$\mathcal{I}^-$是完整的。

2. $\mathcal{I}^-$（$\mathcal{I}^+$）是全局双曲的。

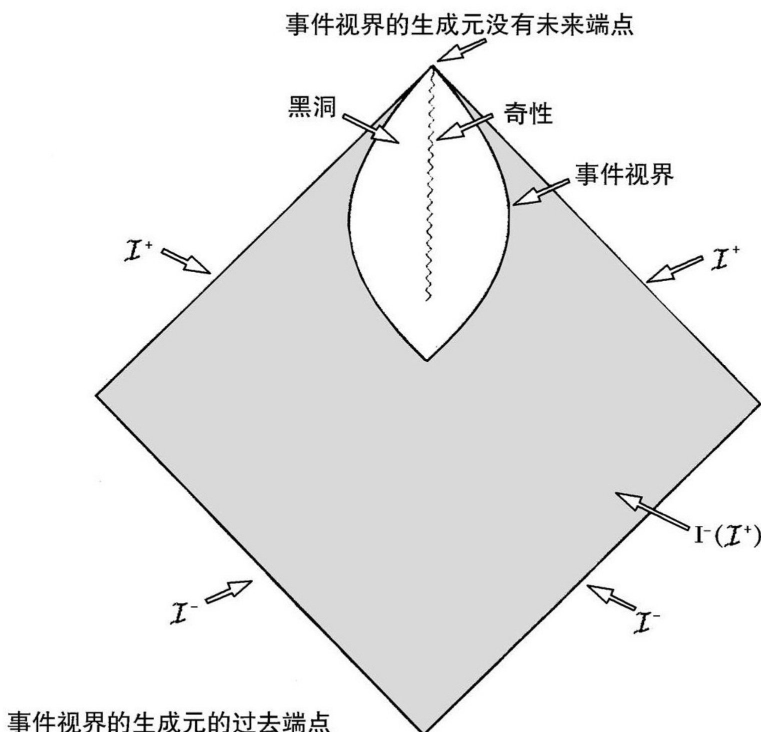


图1.15　坍缩星被共形地嵌入到一个具有边界的流形中

黑洞力学第二定律

$$\delta A \geq 0$$

热力学第二定律

$$\delta S \geq 0$$

如果弱宇宙监督成立的话，则被预言的在引力坍缩中发生的奇性就从$\mathcal{I}^+$看不到。这就意味着时空中必须有一区域，它不在$\mathcal{I}^+$的过去中。因为光或者任何东西都不能从这个区域逃逸到无穷去，所以它被称为黑洞。黑洞区域的边界被称为事件视界。因为它也是$\mathcal{I}^+$的过去的边界，事件视界由零性测地线段所生成，这线段可有过去端点，但是不能有任何未来端点。这样，如果弱能量条件成立的话，视界的生成元就不能收敛。因为如果它们收敛的话，它们将在有限的距离内相交。

这意味着事件视界的截面积永远不能随时间减小，而且一般地讲会增大。此外，如果两个黑洞碰撞并且合并到一起，最终黑洞的面积会比

原先黑洞的面积和更大（图1.16）。这和遵照热力学第二定律的熵的行为非常相似。熵永不减小而且总系统的熵比它组成部分的熵的总和更大。

所谓的黑洞力学第一定律和热力学的相似性愈益明显。该定律把黑洞事件视界面积的改变，其角动量和电荷的改变，与它质量的改变联系起来。人们把这些和热力学第一定律相比较，热力学第一定律按照系统熵的改变和外力对它所做的功给出内能的改变。人们看到，如果事件视界的面积类似于熵，则类似于温度的量便是黑洞的所谓的表面引力k。它是在事件水平上引力场强度的测度。所谓的黑洞力学第零定律，和热力学的相似性更加明显：一个与时间无关的黑洞的事件水平的表面引力处处相等。

在1972年柏肯斯坦受到这些相似性的鼓励，提出事件视界的某个倍数实际上是黑洞的熵。他提议推广的第二定律：黑洞熵和它外面的物质熵的和永远不减小。

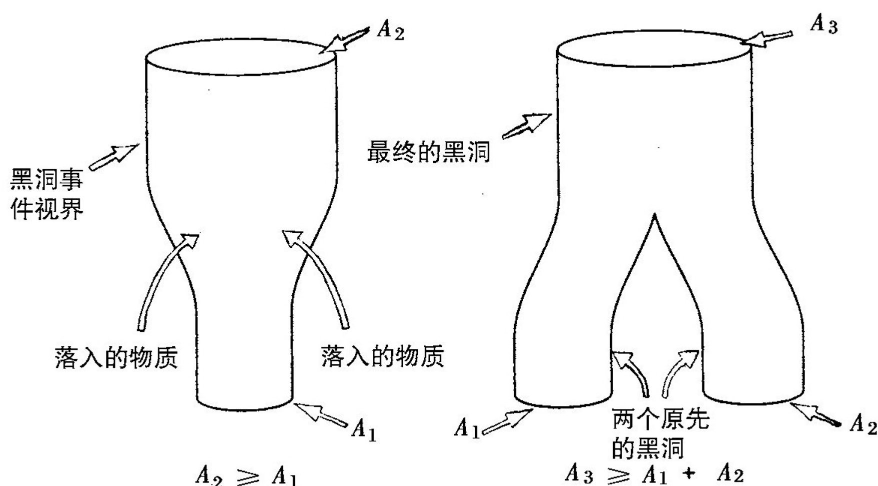


图1.16　当我们把物质抛入黑洞，或者允许两个黑洞合并时，事件视界的总面积永不减小

黑洞力学第一定律

$$\delta E = \frac{k}{8\pi}\delta A + \Omega\delta J + \phi\delta Q$$

热力学第二定律

$$\delta E = T\delta S + P\delta V$$

黑洞力学第零定律

一个与时间无关的黑洞的视界上的k处处相等。

热力学第零定律

一个处于热平衡的系统的T处处相等。

推广的第二定律

$$\delta(S + cA) \geq 0$$

然而，这个建议不是协调的。如果黑洞具有与视界面积成正比的熵，则也应有与表面引力成正比的非零温度。考虑一个黑洞，让它和具有比黑洞更低温的热辐射相接触（图1.17）。因为根据经典理论任何东西都不能逃出黑洞，所以黑洞将吸收一些辐射而不能发射出任何东西。这样，人们就发现热量从低温的热辐射向高温的黑洞流动。因为热辐射的熵损失比黑洞的熵增加更大，所以就违反了推广的第二定律。然而，正如我们将在我下次讲演中看到的，当人们发现黑洞发射出完全热性的辐射时，协调性就被恢复了。这个结果实在太漂亮了，它不可能是一种偶合，或者仅仅是一种近似。这样看来，黑洞的的确确具有内禀引力熵。正如我即将指出的，这与黑洞的非平凡拓扑相关。内禀熵意味着引力引进了一种更高水平的不可预见性，它超越于通常和量子理论相关的不确定性之上。这样当爱因斯坦讲“上帝不掷骰子”时，他错了。对黑洞的思索向人们提示，上帝不仅掷骰子，而且有时还把骰子掷到人们看不到的地方去，使人们迷惑不已（图1.18）。

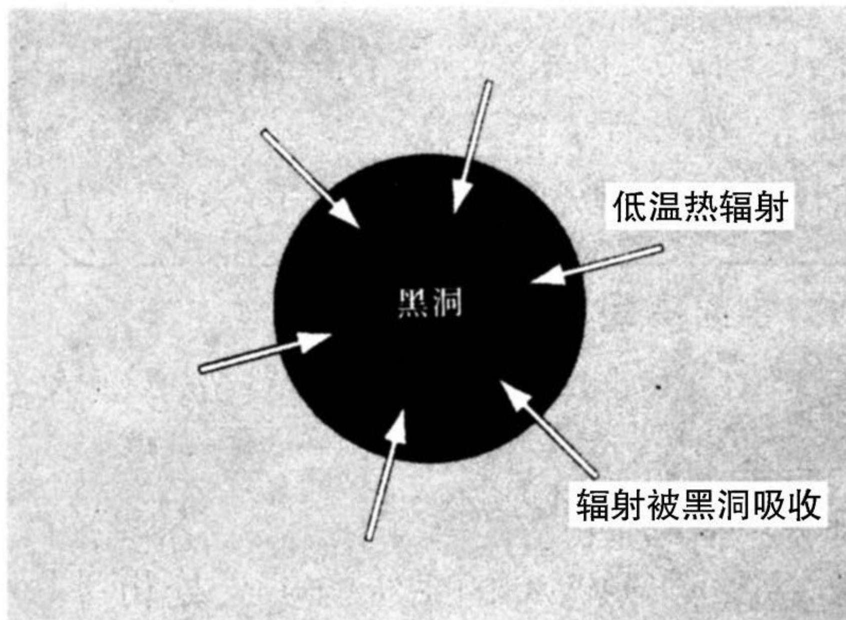


图1.17　黑洞在和热辐射接触时会吸收一些辐射，但是在经典水平上不能发射出任何东西

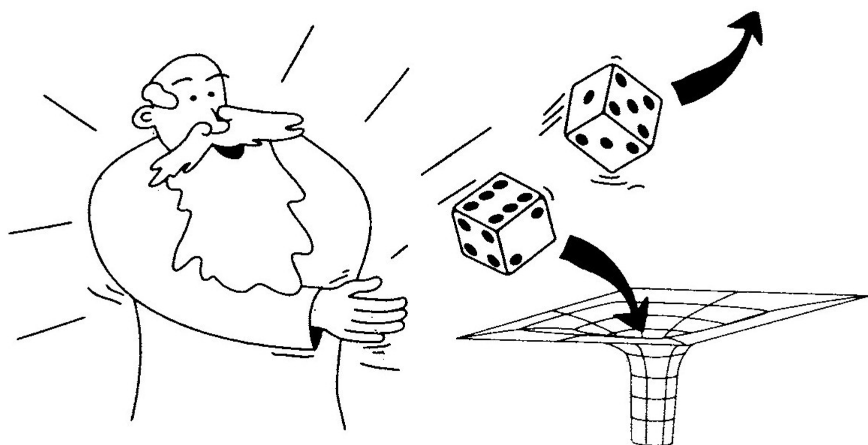


图1.18

第2章　时空奇性结构

罗杰·彭罗斯

史蒂芬·霍金在第一次讲演中讨论了奇性定理。这些定理的主要内容是，在合理的（全局的）物理条件下，可以预料到奇性的出现。它们并没有告知我们有关奇性的任何性质以及在何处出现。另一方面，这些定理是非常一般的，所以，人们自然会问，时空奇性的几何性质如何。通常假定，奇性的特征是曲率发散。然而，这并不是奇性定理本身所准确地告知我们的。

奇性发生于大爆炸、黑洞和大挤压（它可被认为是许多黑洞的合并）。它们也可能以裸奇性出现。与此相关的是所谓的宇宙监督，也就是假定这些裸奇性不会发生。

为了解释宇宙监督的思想，让我们回顾一下这个学科的历史。爱因斯坦方程用以描述一个黑洞的解的第一个显明例子是奥本海默和斯尼德（1939）的坍缩尘埃云。在里面有一奇性，但是由于它被事件视界所包围，所以从外界看不见它。这个视界就是一个在它内部的事件不能把信号发送到无限远的表面。人们忍不住相信，这个图像是一般的，也就是说，它代表了一般的引力坍缩。然而，奥—斯模型具有特殊的对称（也就是球对称），它是否真有代表性尚未清楚。

由于爱因斯坦方程一般来说很难解，人们就转向寻求全局性质，这种性质隐含着奇性的存在。例如，奥—斯模型具有一个捕获面，它是一个表面，其面积沿着起初和它正交的光线减小（图2.1）。

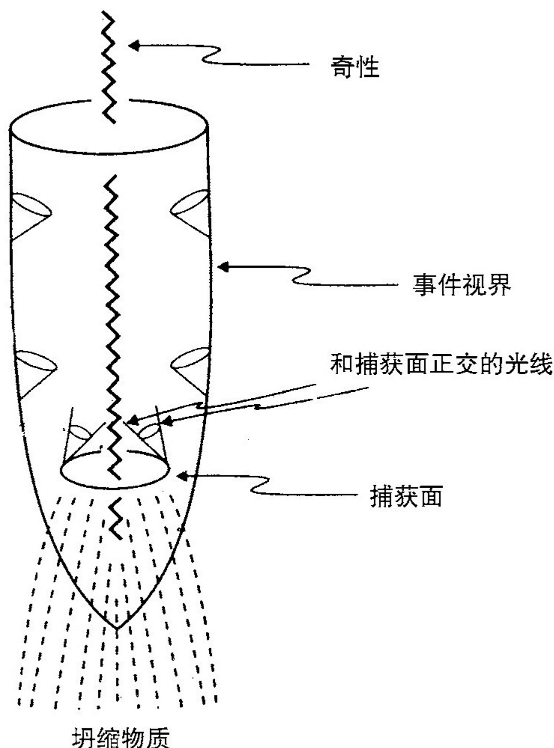


图2.1　奥本海默—斯尼德坍缩尘埃云，可用以解释捕获面

人们也许会试图指出，捕获面的存在意味着存在奇性（这是我基于合理的因果性假设，但是在不假定球对称下能够建立的第一道奇性定理，见彭罗斯，1965）。在假定存在一个收敛光锥时也能导出类似的结果（霍金和彭罗斯，1970；当从一点向不同方向发射出的所有光线在后来某一时刻开始相互收敛时这就发生）。

紧接着史蒂芬·霍金（1965）观察到，在宇宙学的尺度上，可以把我原先的论证颠倒一下，也就是把它应用到时间反演的情形。那么一个反演的捕获面意味着过去曾存在奇性（在适当的因果性假设下）。此处，（时间反演）的捕获面非常大，具有宇宙学的尺度。

我们在这儿主要关心一个黑洞情形的分析。我们知道在某处必有奇性，但是为了得到黑洞，则必须指出它由一个事件视界所环绕。宇宙监督猜测所断言的正是如此，从根本上说，便是不能从外面看到奇性本身。特别是，它表明存在某一区域，不能从那儿把信号发射到外面的无限远。这个区域的边界便是事件视界。我们还能利用史蒂芬上次讲演中的一个定理到这个边界上，由于事件视界是未来零性无穷的过去的边

界，这样，我们知道这个边界：

·在它光滑之处必须是零性表面，由零性测地线所生成。

·包含有从它不光滑处的每一点出发的没有未来端点的零性测地线。

·其空间截面积永远不会随时间减小。

实际上，人们还证明了（伊斯雷尔1967，卡特1971，罗宾逊1975，霍金1972），这种时空的未来渐近极限是克尔时空。因为克尔度规是爱因斯坦真空场方程的非常美妙的准确解，所以这是一项非常令人注目的结果。这个论证还和黑洞熵的问题相关，我将在下次讲演（第4章）回到这上面来。

相应的，我们的确有了和奥—斯模型在定性上相似的某种东西。是做了一些修正，也就是说我们终结于克尔解而不是史瓦西解，但是这些修正是相对次要的。其主要的图像是相当类似的。

然而，其精确的论证是基于宇宙监督假设之上。事实上，宇宙监督是非常重要的，这是因为整个理论都要依赖于它，否则的话我们会遇到可怕的东西，而不是一个黑洞。这样，我们竭力要寻根究底的是，它是否正确。我很久以前曾一度以为，这个假设也许是错误的，因此我千方百计地设法去寻找反例。（史蒂芬·霍金有一次宣布，宇宙监督假设的一个最强的证实是这样的事实，即我努力但是无法证明它是错误的——但是我认为这是一个非常微弱的论证！）

我想在有关时空的理想点某种观念的框架里讨论宇宙监督[这些概念是由塞佛特（1971）、格罗许、克罗海默和彭罗斯（1972）引进的]。其基本思想是人们要把实际的“奇异点”以及“无穷远处的点”，也就是理想点合并到时空中去。让我先介绍IP也就是不可分解的过去集的概念。这儿的“过去集”是包括自身过去的一个集合，而“不可分解”表明它不能被分离成两个互不包含的过去集合。有一道定理告知我们，人们还可以把任何IP当作某一类时曲线的过去（图2.2）。

IP有两个范畴，也就是PIP和TIP。一个PIP是一个正规的IP，也就是一个时空点的过去。一个TIP是一个终端的IP而不是时空中的一个实际点的过去。TIP定义未来理想点。此外，人们可以根据这个理想点是否“在无穷”（在这种情形下有一具有无限本征长度的生成该IP的类时曲线），

或者是否为奇性（在这种情形下生成它的每根类时线都有有限的本征长度）来加以区分，前者称为∞-TIP，后者称为奇性TIP。很明显，所有这些概念都可以类似地适合于未来集而不仅是过去集。在这种情形下，我们就有了划分为PIF和TIF的IF（不可分解的未来）。TIF又可再分为∞-TIF和奇性TIF两种。让我再重申一下，为了使这一切行得通，我们必须假定，实际上不存在闭合类时曲线——其实是最起码的微弱条件：没有两点有相同的未来或相同的过去。

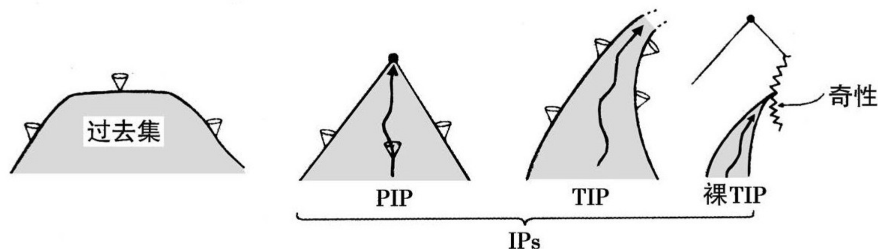


图2.2　过去集，PIP以及TIP

我们在这个框架中如何描述裸奇性和宇宙监督假设呢？首先，宇宙监督假设不应该排除大爆炸（否则的话，宇宙学家就陷入大麻烦之中）。事物总是从大爆炸跑出来而从来不会落进去。这样，我们也许想把裸奇性定义成一根类时曲线既能进又能出的某种东西。那么大爆炸问题就自动被照应到。它不能算成是裸性的。在这个框架里我们把一个裸的TIP定义为包含在一个PIP中的TIP。这本质是一个局部的定义，也就是说，我们不需要观察者跑到无穷去。后来发现（彭罗斯，1979），如果我们在定义（排除裸的TIF）中用“未来”来取代“过去”，则得到在时空中排除裸的TIP的相同条件。这种裸的TIP（或等同的，TIF）在一般的时空中不发生的假设被称为强宇宙监督假设。它的直观意义是，一个奇性点（或无穷点），在这儿是TIP不能随意地在时空的中间“出现”，使得它可在某一有限的点，在这儿是PIP的顶点上被“看到”。由于我们在给定的时空中也许不知道是否真的在无穷，所以观察者不需要在无穷是有意义的。此外，如果强宇宙监督假设被违反了，我们可以在有限的时间，观察到一个粒子真的落入到一个奇点去，在奇点处物理定律不再有效（或者到达无穷，这也一样糟糕）。我们可以用相同语言来表达弱宇宙监督假设：我们只需要用∞-TIP来取代PIP即可。

强宇宙监督假设意味着，一个一般的时空只要具有服从合理的态方程（例如真空）的物质，就能被延拓到不具有裸奇性（裸的奇性的

TIP）的时空。后来发现（彭罗斯，1979）排除TIP等价于全局双曲性，或者说时空为某一柯西面的整个依赖区域（格罗许，1970）。我们注意到，强宇宙监督的表述是明显地时间对称的：如果我们交换IP和IF的话就可以交换未来和过去。

一般来说，我们需要附加的条件去排除霹雳。我们用霹雳来表示一种奇性，它到达零性无穷，在这过程中摧毁时空（参阅彭罗斯，1978，图7）。这也不必违反所述的宇宙监督。还存在更强有力的宇宙监督版本，可以对付这种情形（彭罗斯，1978，条件CC4）。

现在让我们回到宇宙监督是否正确的问题上来。我首先要提到，它可能在量子引力中不成立。尤其是，爆发的黑洞会在这样的一种情景中终结，那时宇宙监督似乎不正确（关于这点史蒂芬·霍金以后会做解释）。

在经典广义相对论中，在两个方向都有不同的结果。我有次试图为证伪宇宙监督，推导出某些如果宇宙监督正确的话必须成立的不等式（彭罗斯，1973）。事实上，后来证明它们是正确的（吉朋斯，1972）——而这些似乎支持类似宇宙监督的某种东西应该成立的思想，在相反的方面，存在一些特例（然而，它们违反了一般的条件），以及某些简略的遭受到各种反驳的数字证据。此外，还有一些我刚刚得知的情形指出，如果宇宙常数是正的，则前面提到的不等式中的一些就不成立。事实上，这是盖瑞·霍罗维茨昨天告诉我的。尤其是，也许在奇性的性质和无穷的性质中存在错综的关系。如果宇宙常数是正的，则无限是类空的，如果是零则为零性的。相应地，如果宇宙常数是正的，奇性有时会是类时的（这意味着裸的，也就是违反了宇宙监督），但是如果宇宙常数为零，也许奇性不能是类时的（也就是满足宇宙监督）。

为了讨论奇性的类时或类空性质，让我解释在IP之间的因果性关系。在推广点之间的因果性时，如果A⊂B，我们就能说一个IP A在因果性方面先于IP B；如果存在一个PIP P使得A⊂P⊂B，则我们说A在时序上先于B。如果A和B中没有一者在因果性上先于另一者，我们说A和B是类空相隔的（图2.3）。

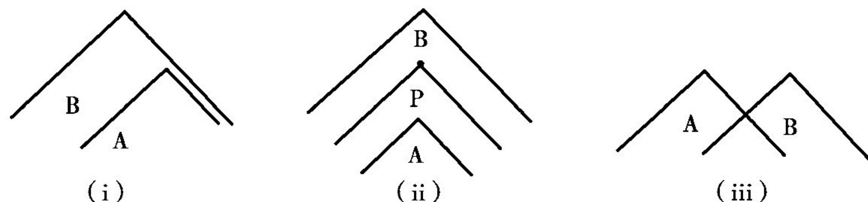


图2.3　IP之间的因果性关系：（i）A因果性地先于B；（ii）A在时序上先于B；（iii）A和B是类空相隔

强宇宙监督可因之表达成，一般奇性永远不能是类时的。类空（或零性）奇性可有过去或未来的类型。因此，如果强宇宙监督成立的话，则奇性可分为两族：

（P）由TIF定义的过去类型；

（F）由TIP定义的未来类型。

裸奇性能把这两种可能性统一成一种，这是由于一个裸奇性同时是TIP和TIF。因此，这两族相互排斥正是宇宙监督的推论。族（F）的典型例子是黑洞中以及大挤压（如果它存在的话）中的奇性，而大爆炸以及可能的白洞（如果它们存在的话）则是族（P）的例子。我实际上不相信大挤压会发生（由于观念的原因我将在最后一次讲演时谈到此点），而白洞则更不可能了，因为它们违反热力学第二定律。

两种类型的奇性也许满足完全不同的定律。可能量子引力对于它们的定律的确应是完全不同的。

我想在这一点上，史蒂芬·霍金和我持不同意见[霍金：正是！]，但是我把以下理由作为这个设想的证据：

（1）热力学第二定律。

（2）早期宇宙的观测（例如宇宙背景探索者），表明它过去是非常均匀的。

（3）黑洞的存在（实际上被观测到）。

从（1）和（2）可以论断道，大爆炸奇点是极端均匀的，而且从（1）可得出可以避免白洞的结论（由于白洞严重地违背了热力学第二定律）。这样，黑洞奇性必须服从非常不同的定律（3）。为了更精确

地描述这种差别，回想一下时空曲率是由黎曼张量R_{abcd}所描写，它是外尔张量（描写潮汐变形，在第一阶的精度下保持体积不变）和等效于里奇张量R_{ab}（乘上度规g_{cd}，适当地把指标混合一下）的那部分之和，后者描述体积减小的变形（图2.4）。

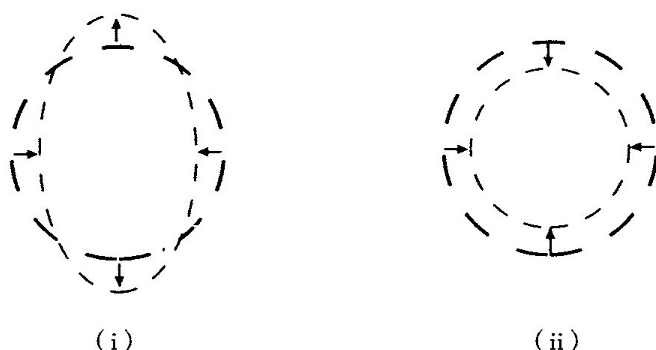


图2.4　时空曲率的加速效应：（i）外尔曲率的潮汐形变；（ii）里奇曲率的体积减小效应

标准宇宙模型（归功于弗利德曼、拉马特、罗伯逊和瓦尔克；例如可参阅林德勒，1977）中的大爆炸具有零外尔张量（还有一个逆命题，这是由纽曼证明的，是说一个宇宙如果具有共形规则的也就是外尔张量为零的初始奇性，而且合适的态方程成立，则必须是弗利德曼宇宙；参阅纽曼，1993）。另一方面，黑/白洞奇性（在一般情形下）都具有发散的外尔张量。这就暗示了如下的：

外尔曲率假设

·初始类型（P）奇性的外尔张量必须为零。

·终结类型（F）奇性不受这个限制。

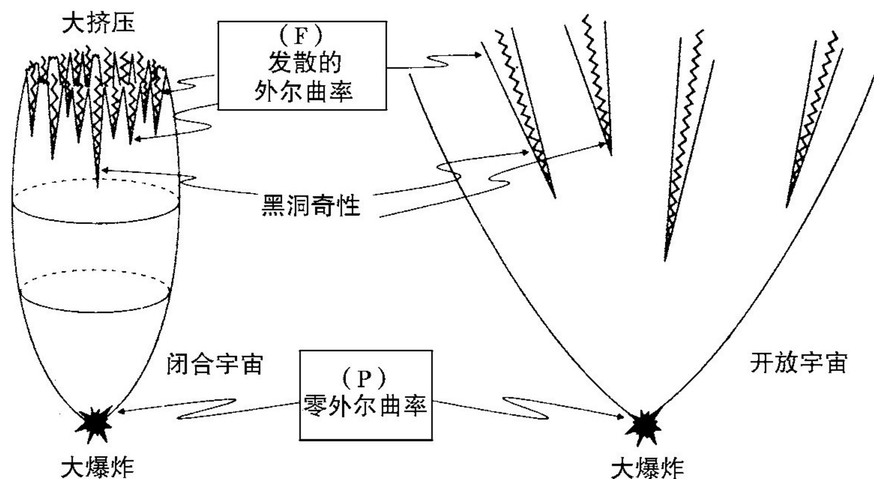


图2.5　外尔张量假设：初始奇性（大爆炸）的外尔曲率必须为零，而终结奇性的外尔曲率会发散

这和人们所看到的十分一致。如果宇宙是闭合的，则终结奇性（大挤压）将具有发散的外尔张量，在一个开放宇宙中所产生的黑洞也具有发散的外尔张量（见图2.5）。

以下事实是对这个假设的进一步支持，早期宇宙相当光滑以及没有白洞的限制使早期宇宙的相空间至少减小了$10^{10^{123}}$倍。（这个数字是按照柏肯斯坦—霍金黑洞熵公式对于10^{80}重子的黑洞推导出来的允许的相空间体积——柏肯斯坦1972，霍金1975——并且宇宙至少有这许多物质。）

这样，就必须有一条定律。它强迫这一个极不可能的结果发生！外尔曲率假设就提供这种定律。

问答

问：你认为量子引力能排除奇性吗？

答：我不太相信。如果事情是这样的话，则大爆炸就是之前的坍缩相的结果。我们就要问，以前的相何以具有如此低的熵。这个图像会牺牲了我们解释第二定律的最好机会。况且，坍缩和膨胀宇宙的奇性必须用某种方式连接到一起，但是它们似乎具有非常不同的几何。一个真正的量子引力论应该取代掉奇性处的时空的目前概念。它必须以一种明晰的方法来谈论我们在经典理论中称作奇性的东西。它根本不应为一个非

奇性的时空，而必须是极为不同的某种东西。

第3章　量子黑洞

史蒂芬·霍金

我准备在我第二次讲演中谈论黑洞的量子理论。它似乎在物理学中导致一种在新的水平上的不可预见性，这种不可预见性超越于和量子力学相关的通常的不确定性之上。这是因为发现黑洞具有内禀的熵，而且引起信息从我们的宇宙区域消失。我应该说，这些断言是富有争议的：许多量子引力的研究者，几乎包括所有从粒子物理转行的人，都本能地拒绝这种思想，即有关一个系统量子态的信息会丧失掉。然而，他们在显示信息何以能从黑洞取出方面徒劳无功。我最终相信，他们将被迫接受我的建议，信息是丧失掉了，正如他们过去被迫同意黑洞辐射一样，这和他们的先验观念互相抵触。

我必须首先提醒你们有关黑洞的经典理论。我们从上次讲演得知，至少在正常的情形下引力总是吸引的。如果引力像电动力学那样，时而吸引时而排斥，我们就永远不会觉察到它，因为它大约比电磁力微弱10^{40}倍。正是由于引力总是同号，才使得像我们和地球这样的两个宏观物体中的粒子之间的引力叠加起来，得到我们能感觉得到的力量。

引力是吸引的这个事实意味着，它要把宇宙中的物质赶到一起形成例如恒星和星系这样的物体。在一段时间内，恒星可由热压力，星系可由旋转以及内部运动来支撑自己，避免进一步收缩。然而，热和角动量最终会被抽走，物体就开始收缩。如果质量比太阳的一倍半左右还小，电子或者中子的简并压力就能阻止它收缩。该物体就会分别以白矮星或者中子星作为归宿。然而，如果质量比这个极限还大，则没有任何办法可以支撑它并阻止它继续收缩。一旦它缩小到某一临界的尺度，它表面上的引力场会变得这么强，甚至连光锥都向里弯折，正如图3.1所示的。我是想过为你画一张四维图。然而，政府经费的缩减使剑桥大学只能提供得起两维的屏幕。因此，我把时间标在垂直方向，并且利用透视法把三维空间中的两维标出来。你可以看到，甚至连外向的光线也被相互向内地弯折了，它变成收敛的而不是发散的了。这表明存在一个闭合的捕获面，这正是霍金—彭罗斯定理的第三个条件中的一种情形。

如要宇宙监督猜想是正确的，则捕获面和它所预言的奇性不能在远处被看到。这样，在时空中就有这样的一个区域，不可能从那儿逃逸到无穷远去。正如我们在上次讲演中得知的，事件视界的截面积永远不会减小，至少在经典理论中情形应是如此。这些以及球形坍缩的微扰计算暗示，黑洞将会以一种稳恒态为归宿。由伊斯雷尔、卡特、罗宾逊以及我自己共同努力所证明的无毛定理指出，在没有物质场时克尔解是仅有的稳恒黑洞。它们由两个参数所表征，即质量M和角动量J。罗宾逊把无毛定理推广到电磁场存在的情形。这就加上了第三个参数Q，也就是电荷。对于杨—米尔斯场，无毛定理还未被证明，但是仅有的区别似乎是要加上作为不稳定解的分立族指标的一个或多个整数。可以证明与时间无关的爱因斯坦—杨—米尔斯黑洞不会再有更多的连续自由度。

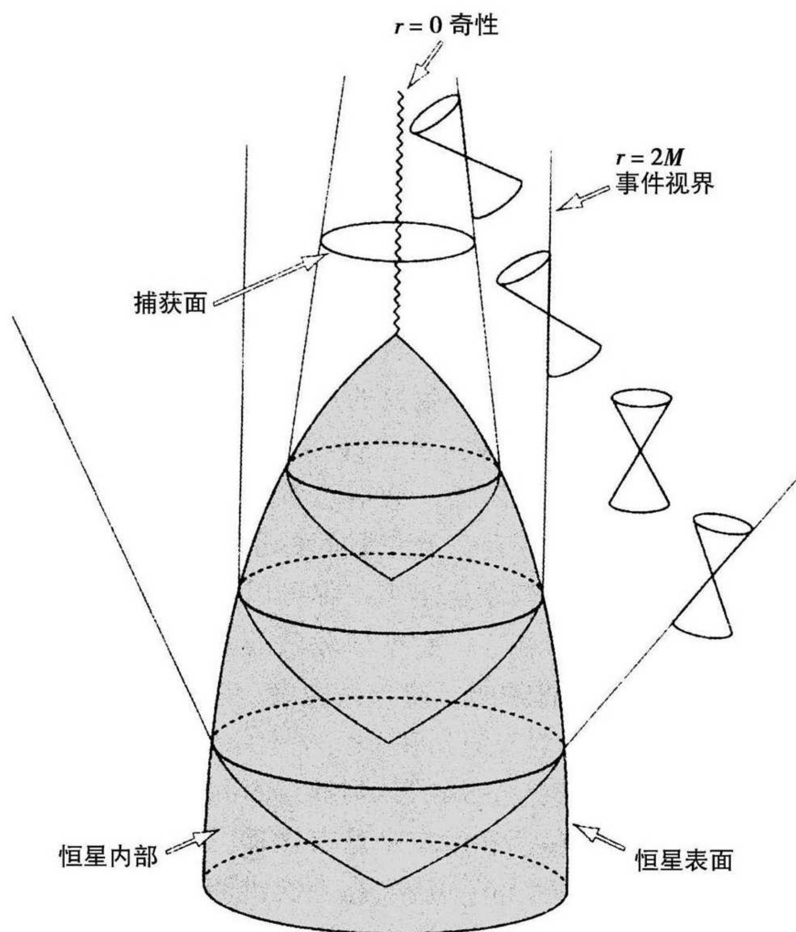
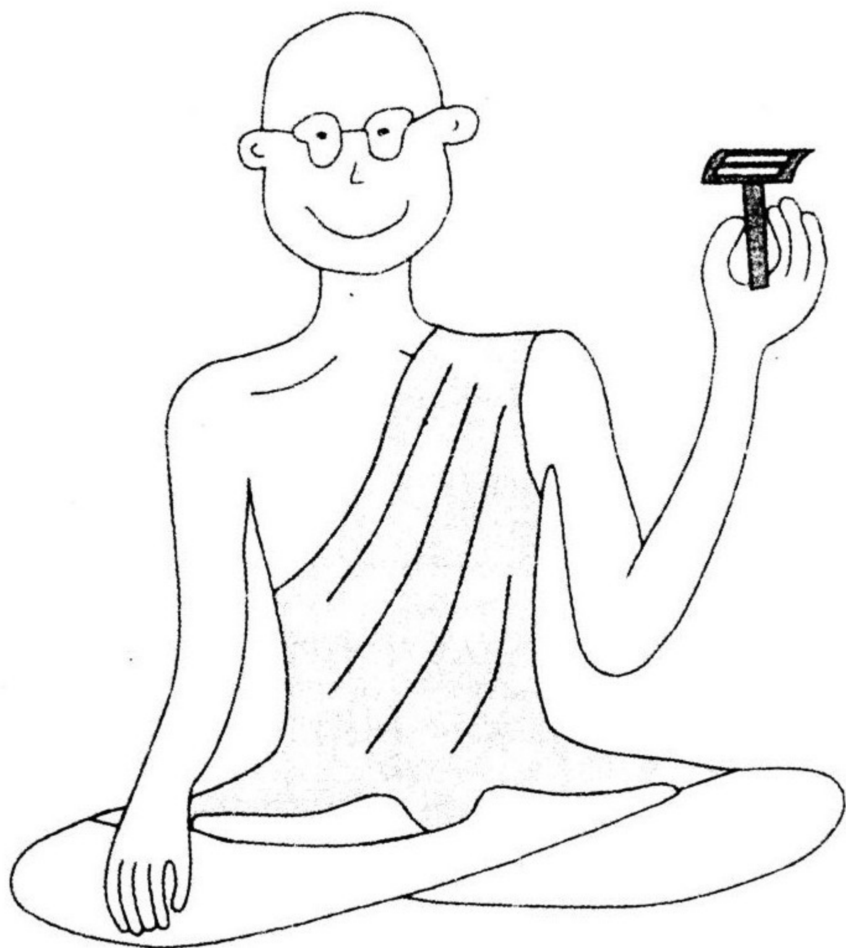


图3.1　一个恒星坍缩形成黑洞的时空图，图上标出事件视界和闭合捕获面

无毛定理指出，当一个物体坍缩形成黑洞时，大量信息丧失了。坍缩物体要用大量参数才能描述。其中有物质的类型以及物体分布的多极矩。可是形成的黑洞和物质类型完全无关，而且除了最先的两个极矩外，其他的所有多极矩迅速丧失。这两个极矩便是：质量和二极矩，也就是角动量。



无毛定理：稳态黑洞是用质量M，角动量J，以及电荷Q来表征。

信息丧失在经典理论中没有什么关系。人们可以说，有关坍缩物体的全部信息仍然藏在黑洞之中。一位外在于黑洞的观察者去确定以前的坍缩物体是什么将是非常困难的。然而，这在经典理论中在原则上仍然是可能的。观察者实际上将永远看得见坍缩物体。它会显得越来越迟缓，在它接近事件视界时变得非常黯淡。但是观察者仍然能看到它是什

么组成的以及物质如何分布。然而，量子理论把这一切都改变了。首先，坍缩物体在它穿越事件视界之前只发射出有限数目的光子。要把关于坍缩物体的信息都携带上，这是十分不够的。这意味着，在量子理论中，外界观察者根本无法测量坍缩物体的状态。人们也许会认为这无关紧要，因为尽管从外面测量不到信息，它仍然被保存在黑洞之中。但是正在此处量子理论对黑洞的第二个效应出现了。正如我要指出的，量子理论使黑洞辐射并且丧失质量。看来它们最终会完全消失，和它一道消失的还有在它们当中的信息。我将要论断，这个信息的确是丧失掉了，而且不能以某种方式得到恢复。正像我要指出的，这种信息丧失给物理学引进了新水平的不确定性，这种不确定性是超越于和量子理论相关的通常的不确定性之上。可惜的是，和海森伯不确定性原理不同，这种额外水平的不确定性在黑洞情形下很难被实验所证实。但是正如我将在第三次讲演（第5章）中论断的，在某种意义上，我们已经在测量微波背景起伏中观察到这种效应。

在由坍缩形成的黑洞的背景上做量子场论研究时，首次发现了量子论引起黑洞辐射的事实。利用通常称作彭罗斯图的工具有助于看清这是如何发生的。然而，我以为彭罗斯本人会同意，它们更应该称作卡特图，因为卡特首先系统地使用它们。在球形坍缩中，时空和角度θ和φ无关。所有的几何都在t-r平面上发生。因为任何二维面都和平空间相共形，所以人们可以用一张图来代表因果性结构，在图中r-t平面中的零性线是和垂直方向成$\pm 45^{\circ}$的角度。

我们从平坦的闵可夫斯基空间开始，其卡特—彭罗斯图是一个立在一个顶点上的三角形（图3.2）。处于右边的两条斜边对应于我在第一次讲演中提到的过去和未来零性无穷。它们真正是处于无穷远处，但是当接近过去或者未来无穷时所有距离都由共形因子所缩小。这个三角形中的每一点都对应于半径为r的二维球。左边的垂直线$r=0$代表对称中心，而在图的右边$r\to\infty$。

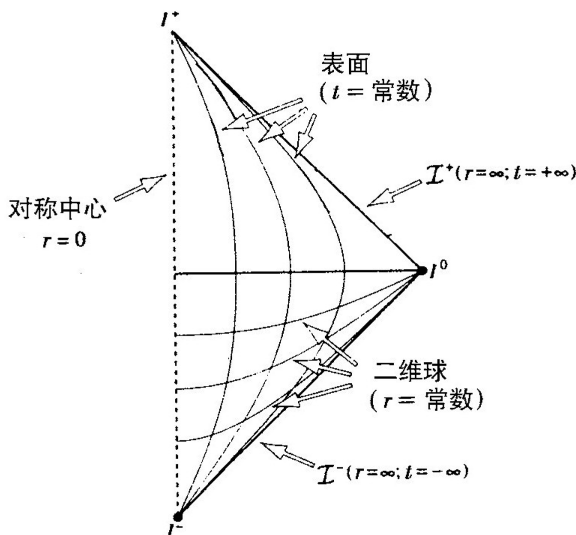


图3.2

闵可夫斯基空间的卡特—彭罗斯图

人们从图上可以很容易看到，闵可夫斯基空间中的每一点都是在未来零性无穷$\mathcal{I}^+$的过去中。这表明不存在黑洞和事件视界。然而发生球对称物体坍缩的话，图就相当不一样了（图3.3）。它在过去看起来是相同的，但是现在三角形的顶被切去了，而且用一个水平的边界来取代。这便是霍金—彭罗斯定理所预言的奇性。现在人们可以看到，在这根水平线之下有些点不是处于未来零性无穷$\mathcal{I}^+$的过去。换句话说，存在有黑洞。其事件视界，也就是黑洞边界是从右上角下来的斜线，并和对应于对称中心的垂直线相交。

人们可以在此背景中考虑一个标量场。如果时空是与时间无关的，则在$\mathcal{I}^-$只包含正频率的波动方程的解，在$\mathcal{I}^+$也具有正频率。这就表明没有粒子产生，而且如果原先没有标量粒子的话，则在$\mathcal{I}^+$处不会有向外飞行的粒子。

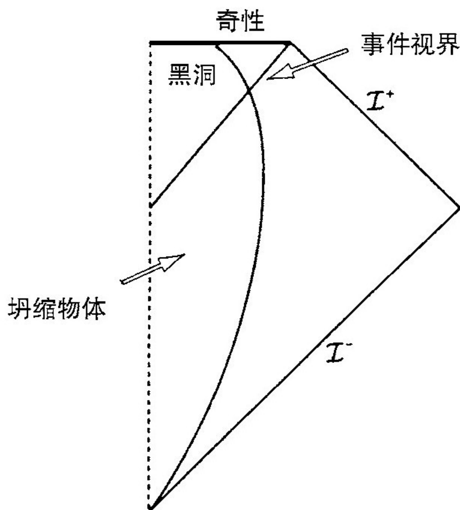


图3.3　一颗恒星坍缩形成黑洞的卡特—彭罗斯图

然而，在坍缩之际度规与时间相关。这就导致在$\mathcal{I}^-$处是正频率的一个解到达$\mathcal{I}^+$时部分地变成负频率的。人们可以首先取一个在$\mathcal{I}^+$处具有时间依赖$e^{-i\omega\mu}$的波，让它往回传播到$\mathcal{I}^-$，用这种办法来计算这种混合。当人们这么做时，他们会发现通过接近视界的部分波被大大地蓝移了。令人印象深刻的是，人们发现，在晚期的极限，其混合与坍缩的细节无关。它只依赖于表面引力k，这是黑洞视界上引力场强度的测度。正、负频率的混合导致粒子产生。

当我于1973年首次研究这个效应时，我预料到会发现在坍缩时的一次辐射暴，但是之后粒子不再产生，最后余下的是一个真正黑的黑洞。使我大为惊讶的是，我发现在坍缩时的一次辐射暴后仍然维持着粒子产生和发射的稳恒的速率。此外，这种辐射具有温度$\frac{k}{2\pi}$，是准确的热性的。这正是使黑洞具有和它事件视界面积成比例的熵的观念协调所亟需的东西。它还把该比例常数确定为在普朗克单位下的四分之一，在普朗克单位中$G=c=\hbar=1$。普朗克单位的面积是10^{-66}平方厘米，这样具有太阳质量的黑洞具有数量级为10^{78}的熵。这反映了可能制造该黑洞的极其巨大数目的不同方式。

黑洞热辐射

温度 $T=\dfrac{k}{2\pi}$

熵 $S=\dfrac{1}{4}A$

当我首次发现黑洞辐射时，从相当繁乱的计算中导出了完全热性的辐射，这似乎是一桩奇迹。然而，和詹姆·哈特尔以及盖瑞·吉朋斯的合作揭露了深层的原因。为了解释这一点，我要从史瓦西度规出发。

史瓦西度规

$$\mathrm{d}s^2=-\left(1-\frac{2M}{r}\right)\mathrm{d}t^2+\left(1-\frac{2M}{r}\right)^{-1}\mathrm{d}r^2$$

$$+r^2\left(\theta^2+\sin^2\theta\mathrm{d}\phi^2\right)$$

这代表了非旋转的黑洞归宿的引力场。在通常的r和t坐标系中，于史瓦西半径r＝2M处有一表观奇性。然而，这只不过是因为坐标选取不好而引起的。人们可以选取其他的坐标使那儿的度规正常。

其卡特—彭罗斯图具有两头被切平的金刚石形状（图3.4）。它被在r＝2M的两个零性面分割成四个区域。右边的在图中被标为①的区域是渐近平坦的空间，我们就假定生活在此。正如平坦时空的情形，它具有过去和未来零性无穷$\mathcal{I}^-$和$\mathcal{I}^+$。左边还存在另一个渐近平坦区域③，它只能通过一个虫洞和我们的宇宙相连接。然而，正如我们将会看到的，它是通过虚时间和我们的区域相连接。从左下端到右上端的零性面正是我们从那儿能逃逸到在右边的无穷的区域的边界。这样，它是未来事件视界，修饰词未来是用来和从右下端到左上端的过去事件视界相区别。

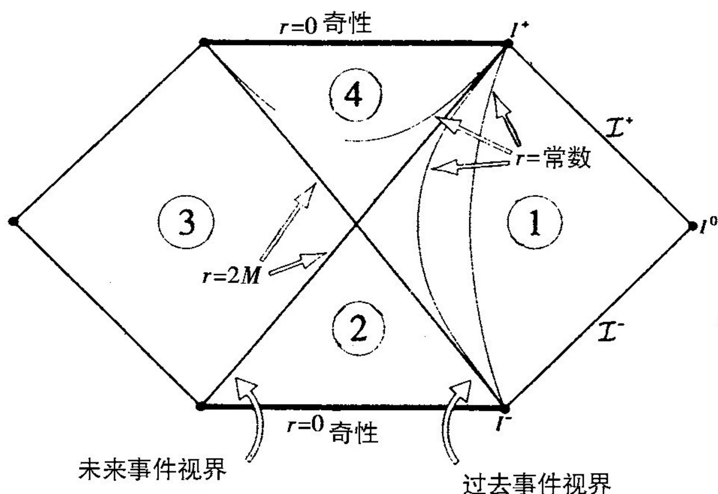


图3.4　永久史瓦西黑洞的卡特—彭罗斯图

让我们回到在原始的r和t坐标中的史瓦西度规上来。如果我们取t＝iτ则得到正度规，我把这种正定度规称作欧氏的，尽管它也许是弯曲的。在欧氏史瓦西度规中在r＝2M处又有一个表观奇性。然而，人们可以定义一个新的径向坐标

$$x = 4M(1-2Mr^{-1})^{\frac{1}{2}}\text{。}$$

欧氏史瓦西度规

$$\mathrm{d}s^2 = x^2\left(\frac{\mathrm{d}\tau}{4M}\right)^2 + \left(\frac{r^2}{4M^2}\right)^2 \mathrm{d}x^2 + r^2\left(\mathrm{d}\theta^2 + \sin^2\theta\,\mathrm{d}\phi^2\right)$$

如果人们把坐标τ以周期8πM来相等同，则x-τ平面上的度规就和极坐标的原点相似。类似地，其他欧氏黑洞度规在它们的视界也有表观奇性，只要在虚时间坐标中以周期$\frac{k}{2\pi}$来相等同，就能摆脱这种表观奇性（图3.5）。

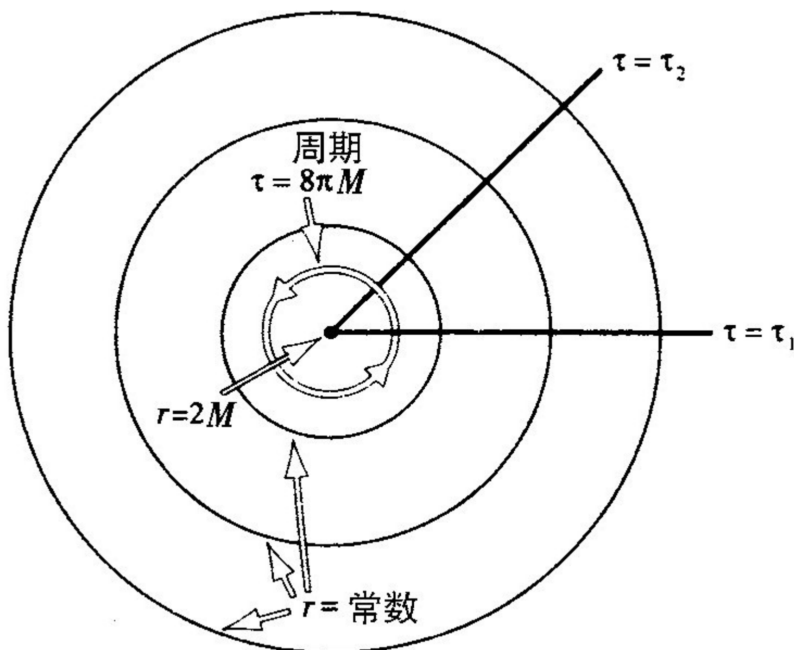
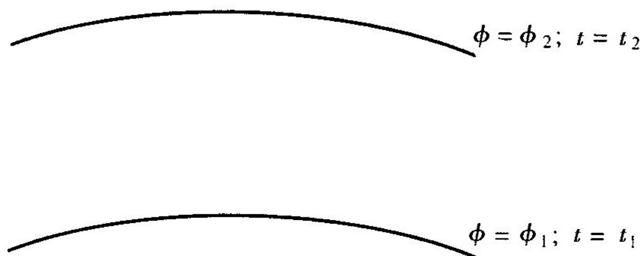


图3.5　欧氏史瓦西解，这里τ被周期性地等同

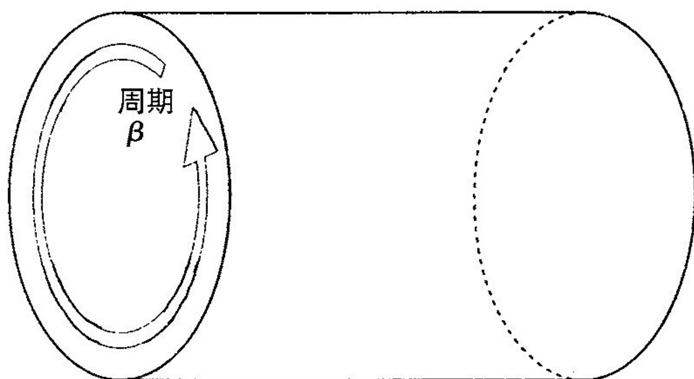
虚时间以某种周期β相等同的意义是什么呢？为了看到这一点，考虑从面t_1上的场配置φ_1到面t_2上的场配置φ_2的幅度。它可由$e^{-iH(t_2-t_1)}$的矩阵元得出。然而，人们还可以用一个路径积分来代表这个幅度，这个积分是对在t_1和t_2之间的所有场φ的求和得出，而在两个端面上要求φ和场φ_1以及φ_2相一致（图3.6）。

图3.6　从在t_1时态φ_1到t_2时态φ_2的幅度



$$\left\langle \phi_{2,} t_2 \middle| \phi_1, t_1 \right\rangle = \left\langle \phi_{2,} \middle| \exp\left(-\mathrm{i}H\left(t_2 - t_2\right)\right) \middle| \phi_1 \right\rangle$$
$$= \int D[\phi] \exp\left(\mathrm{i}I[\phi]\right)$$

人们现在可以把时间间隔（t_2-t_1）取作虚的，并让它等于β（图3.7）。人们还可以使初始场φ_1和终结场φ_2相同，并对态的完备的基求和。在左边就得到$e^{-\beta H}$对所有态求和的平均值。这正是在温度$T=\beta^{-1}$下的热力学配分函数。



$$t_1 - t_2 = i\beta, \phi_2 = \phi_1$$

$$Z = \sum \langle \phi_n | \exp(-\beta H) | \phi_n \rangle$$

$$= \int D[\phi] \exp\left(-\hat{I}[\phi]\right)$$

图3.7　对在虚时间方向具有周期$\beta=T^{-1}$的欧氏时空上的所有场求和的路径积分，可以得到温度T下的配分函数

在方程的右边是一个路径积分。人们使φ_1和φ_2相同并对所有的场配置φ_n求和。这表明，实际上是在进行路径积分，是对在虚时间方向以β为周期等同的时空上的所有场求和。这样在温度T下，场φ的配分函数可由对在欧氏时空上的所有场求和的路径积分给出。这个时空在虚时间方向具有周期$\beta=T^{-1}$。

如果人们对在虚时间方向周期β等同的平坦时空上进行路径积分，就会得到黑体辐射的配分函数的通常结果。然而，正如我们刚看到的，欧氏史瓦西解在虚时间方向也具有$\frac{2\pi}{k}$的周期。这意味着在史瓦西背景中的场的行为正如同处于具有$\frac{k}{2\pi}$温度的热状态中一样。

虚时间的周期性解释了为何频率混合的繁复计算会导致准确的热性的辐射。然而，这个推导避免了参与在频率混合方法中的极高频率的问题。它还可适用于在背景中的相互作用场的情形。在一个周期性背景中

进行路径积分意味着，所有物理量，譬如平均值等等，都是热性的。利用频率混合方法可非常困难地得到同样结果。

人们可以把这些相互作用推广到包括引力场自身的相互作用。人们可以从诸如欧氏史瓦西度规的背景度规g_0出发，这种度规是经典场方程的解。然后把作用量I按围绕着g_0的微扰δg的幂次展开：

$$I[g]=I[g_0]+I_2(\delta g)^2+I_3(\delta g)^3+\ldots$$

由于背景是场方程的解，所以线性项不出现。平方项可以认为是用来描述背景中的引力子，而立方项以及更高项描述引力子之间的相互作用。对于平方项的路径积分是有限的。纯粹引力在双圈水平上是重正化发散的，但是在超引力理论中它会和费米子相对消。因为还没有人足够勇敢或愚勇地进行过计算，所以还不知道超引力理论在三圈或更多圈水平上是否发散。最近的一些工作显示，也许它们在任意高阶都是有限的。但是，即便在更高阶发散，除了当背景在普朗克长度10^{-33}厘米的尺度下变曲情形之外，其效应是微不足道的。

零阶项比高阶项更有趣，这也就是背景度规g_0的作用量：

$$I=-\frac{1}{16\pi}\int R(-g)^{\frac{1}{2}}\mathrm{d}^4x+\frac{1}{8\pi}\int k(\pm h)^{\frac{1}{2}}\mathrm{d}^3x$$

广义相对论的通常的爱因斯坦—希尔伯特作用量是曲率标量R的体积分。对于真空解它为零，这样人们会以为欧氏史瓦西解的作用量为零。然而，在作用量中还有一个表面项，它和边界面的第二基本形式的迹K的积分成比例。当人们把这一项包括进去，并减去平空间的边界项，就会发现欧氏史瓦西度规的作用量为$\frac{\beta^2}{16\pi}$，这儿β是在无穷处的虚时间周期。这样，对配分函数Z的路径积分的最重要贡献是$e^{\frac{-\beta^2}{16\pi}}$：

$$Z=\sum\exp(-\beta E_n)=\exp\left(-\frac{\beta^2}{16\pi}\right)。$$

如果取lg Z对周期β的微分，就得到能量，或者质量的平均值：

$$\langle E\rangle=-\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}\beta}(\lg Z)=\frac{\beta}{8\pi}$$

这就得到质量$M=\frac{\beta}{8\pi}$。这就证实了质量和周期，或者是温度倒数的关系，这是我们已经知道的。然而，人们可以走得更远。按照标准的热力学论证，配分函数的对数等于负的自由能除以温度

$$\lg Z=-\frac{F}{T}$$

而自由能是质量或能量加上温度乘以熵S：

$$F=\langle E\rangle+TS。$$

把这一切合并起来就能看出，黑洞的作用量给出了$4\pi M^2$的熵：

$$S=\frac{\beta^2}{16\pi}=4\pi M^2=\frac{1}{4}A$$

这刚好使黑洞定律和热力学定律相同。

为什么人们能得到这种内禀引力熵，而在其他的量子场论中找不到它的对应物呢？其原因是引力允许时空流形具有不同的拓扑。在我们考虑的情形下，欧氏史瓦西解在无穷具有一个拓扑为$S^2\times S^1$的边界。S^2是在无穷的巨大的类空二维球，而S^1对应于虚时间方向，它被周期性地等同（图3.8）。人们至少可以在此边界内用两种不同拓扑的度规来填充。其中一个当然是欧氏史瓦西度规。它具有$R^2\times S^2$的拓扑，也就是欧氏二维平面乘上二维球。另一个是$R^3\times S^1$，欧氏平空间在虚时间方面周期等同的拓扑。这两种拓扑具有不同的欧拉数。周期等同平空间欧拉数为零，而欧氏史瓦西解的欧拉数为二。其意义如下所述：在周期等同平空间的拓扑上，人们可以找到一个周期性时间函数τ，其梯度处不为零，并且它和在无穷处的边界上的虚时间坐标相符。然后可以算出在两个面τ_1和τ_2之间区域的作用量。对作用量有两个贡献，一个是对物质拉氏量加上爱因斯坦—希尔伯特拉氏量的体积分，另外一个是表面项。如果解是时间无关的，则在$\tau=\tau_1$处的表面项就和在$\tau=\tau_2$处的相抵消。这样，在无穷的边界是仅有的对表面项有贡献之处。得到的表面项是质量和虚时间间隔乘积的一半。如果质量不为零，则必须存在产生该质量的非零

物质场。可以证明物质拉氏量加上爱因斯坦—希尔伯特拉氏量的体积分也得出$\frac{1}{2}M(\tau_2-\tau_1)$。这样总作用量是M（$\tau_2-\tau_1$）（图3.9）。如果把这个对配分函数对数的贡献代入热力学公式，就会发现能量平均值为质量，正如所预期的。然而，背景场对熵的贡献是零。

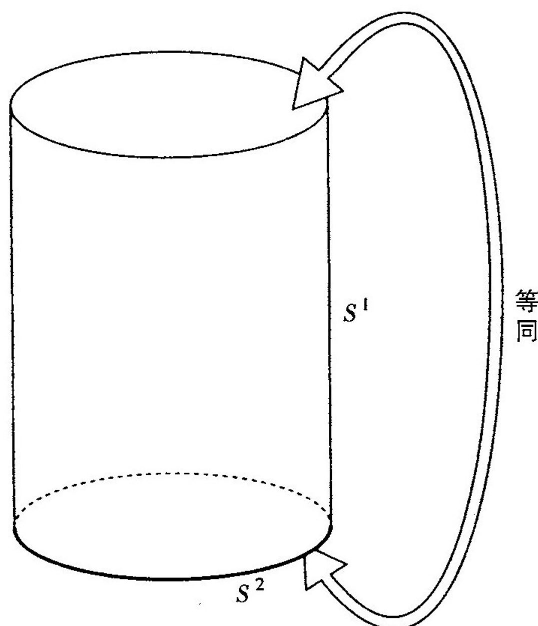


图3.8　欧氏史瓦西解在无穷处的边界

然而，对于欧氏史瓦西解情况就不同了。因为欧拉数为二而不是零，人们就找不到一个其梯度处处不为零的时间函数τ。人们充其量只能选取史瓦西解的虚时间坐标。如果算出两个常数τ表面之间的作用量，由于没有物质场以及曲率标量为零，其体积分为零。而在无穷的迹K的表面项又是$\frac{1}{2}M(\tau_2-\tau_1)$。然而，现在在视界处还有另一个表面项，视界便是$\tau_1$和$\tau_2$表面在一个角落相遇之处。人们可以对此表面项求值，发现它又等于$\frac{1}{2}M(\tau_2-\tau_1)$（图3.10）。这样，在$\tau_1$和$\tau_2$之间区域的总作用量为M（$\tau_2$-$\tau_1$）。如果人们利用这个作用量并且设$\tau_2$-$\tau_1=\beta$，就会发现熵为零。然而，如果我们从四维而不是3＋1维的观点看待欧氏史瓦西解的作用量，由于度规在视界处是规则的，就没有理由把该处的表面项包括进去。排除视界处的表面项相当于作用量被减小了视界面积的四分之一，这刚好是黑洞的内禀引力熵。

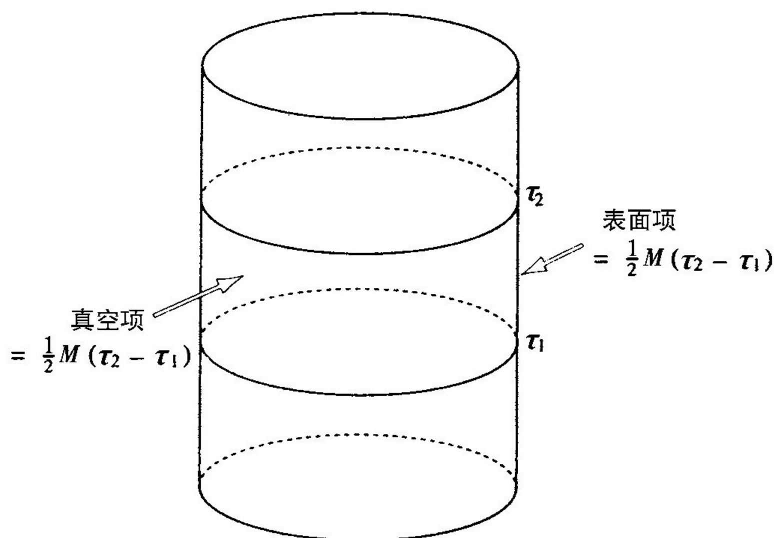
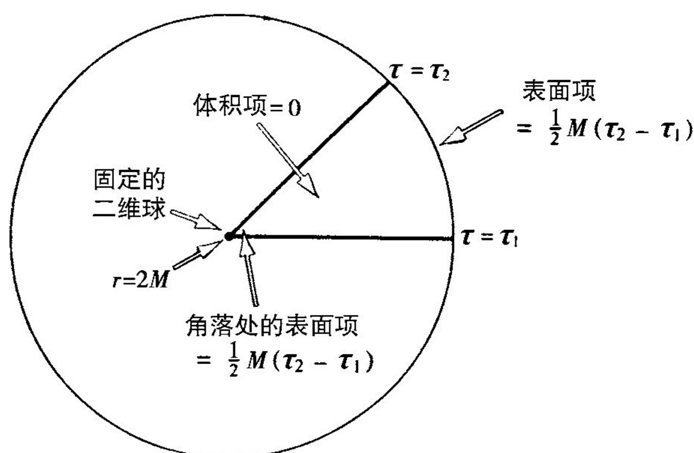


图3.9　周期等同欧氏平空间的作用量＝M（τ_2-τ_1）

黑洞熵和拓扑不变量亦即欧拉数相关联的这一事实，是一桩非常强的论断，即便我们必须进入更基本的理论，这个论断仍然有效。对于大多数粒子物理学家而言，这一观念无异为一道诅咒，他们是一大批极端保存者，要把一切都弄得像杨—米尔斯理论。他们赞成，如果黑洞比普朗克长度更大，则黑洞发出的辐射似乎是热性的，而不管它是如何形成的。但是他们也许会声称，随着黑洞损失质量而缩小到普朗克尺度，量子广义相对论就会失效，一切都化为乌有。然而，我将描述一个黑洞的理想实验，信息在黑洞中看来是丧失了，而在视界外时空总是维持着很小的曲率。



包括角落贡献的总作用量＝M（τ_2-τ_1）

排除角落贡献的总作用量＝1/2M（τ_2-τ_1）

图3.10　由于我们没有把在r＝2M角落处的贡献包括进来，欧氏史瓦西解的总作用量为1/2M（τ_2-τ_1）

一个强电场中能产生带正、负电荷的粒子对，人们知道这个事实已有相当长的时间了。一种看待这个现象的办法是注意到，一个具有电荷q的诸如电子的粒子在平坦的具有均匀电场E的欧氏空间中的运动轨道是一个圆周。人们可以把这个运动从虚时间τ向实时间t做解析连续。他就会得到一对带正、负电的粒子，由于电场的拉力被相互分开而加速飞离（图3.11）。

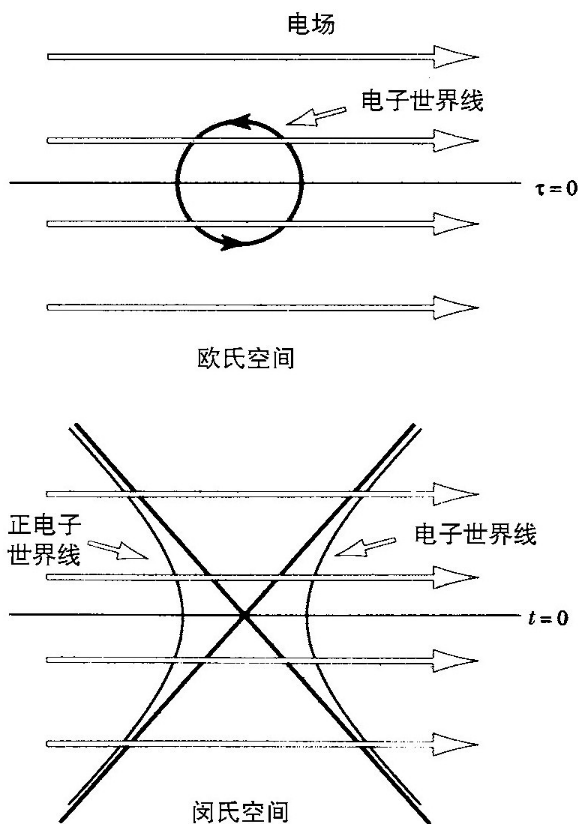


图3.11　在欧氏空间中，一个电子在电场中沿着圆周运动。在闵氏空间中，我们得到一对带反号电荷的粒子，相互加速飞离

对产生的过程可由把两张图沿着t＝0或τ＝0的线切断来描述。然后把闵氏空间图的上一半和欧氏空间图的下一半接起来（图3.12）。从这个图像中可以看出带正电和带负电的粒子其实是同一粒子。从一个闵可

夫斯基世界线过渡到另一个是通过欧几里得空间的隧道穿透的。对产生概率的第一阶近似是e^{-I}，此处

$$欧氏作用量\ I=\frac{2\pi m^2}{qE}。$$

人们已经在实验中观察到强电场对产生，其产生率和这些估计相一致。

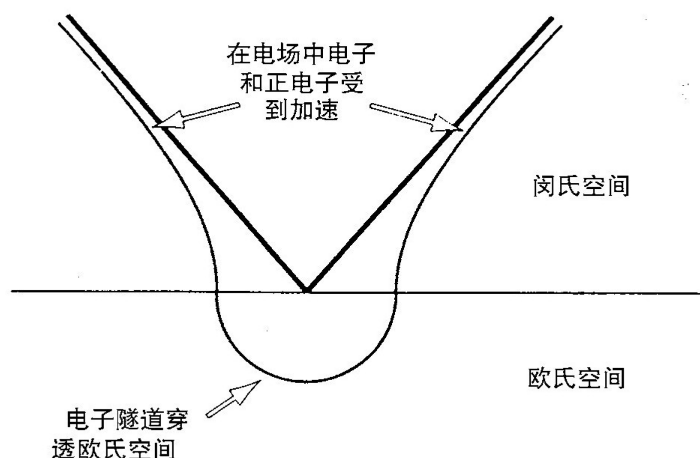


图3.12　可以利用半张欧氏图和半张闵氏图的连接来描述对产生

由于黑洞也能带电荷，所以人们预料，它们也可以成对地产生。然而，因为黑洞的质荷比大了10^{20}倍，所以产生率和电子—正电子对相比就显得非常微小。这表明在产生黑洞对的概率达到可观的数值之前，电子—正电子对产生早已把任何电场中和了。然而，还有一些带有磁荷的黑洞解。因为不存在带磁荷的基本粒子，所以这类黑洞不能由引力坍缩产生。但是人们可以预料，它们可以在一强磁场中成对地产生。因此，磁场可以强到足以使带磁荷的黑洞对产生的概率相当可观。

1976年恩斯特找到了一个代表在磁场中的两个带磁荷的相互加速离开的黑洞的解（图3.13）。黑洞在弯曲的欧氏空间沿着一个圆周运动，正如同在平坦的欧氏空间电子沿着一个圆周运动一样（图3.14）。因为虚时间不仅在围绕黑洞的视界而且在围绕黑洞运动的圆周的中心都是周期性的，所以引起了复杂性。人们必须调整黑洞质荷比使这两个周期相同。在物理学上，这表明人们应这样选取黑洞的参数，使得黑洞的温度和由于加速而呈现的温度相等。随着磁荷趋近于在普朗克单位下的质

量，黑洞的温度趋近于零。这样，在弱磁场中，在低加速时，人们总可以使两个周期相配合。

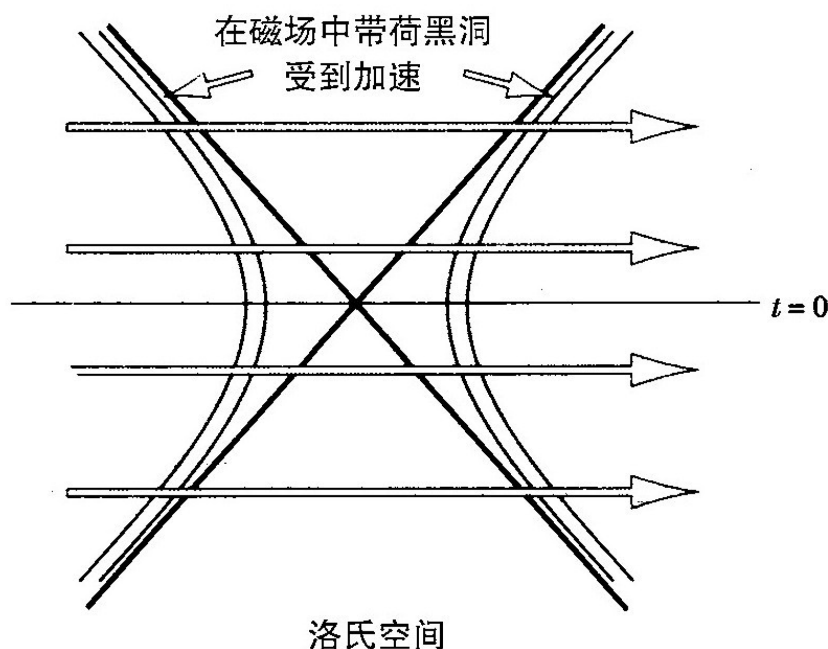


图3.13　在磁场中，一对带相反磁荷的黑洞相互加速飞离

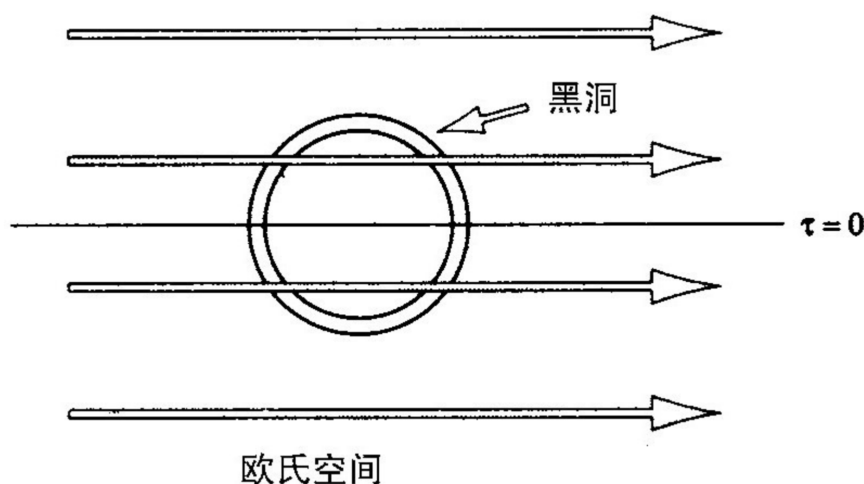


图3.14　在欧氏空间中一个带荷的黑洞沿着圆周运动

正如在电子对产生的情形，人们可以利用欧氏解的虚时间的下半部

和洛氏解的实时间的上半部相连接来描述黑洞对的产生（图3.15）。人们可以认为黑洞在欧氏区域隧道穿透，并作为一对带反号磁荷的黑洞出现，它们被磁场加速而相互飞离。由于加速黑洞解在无穷趋于均匀的磁场，所以不是渐近平坦的。但是人们仍然可以用它来估计在磁场的局部区域黑洞对的产生率。

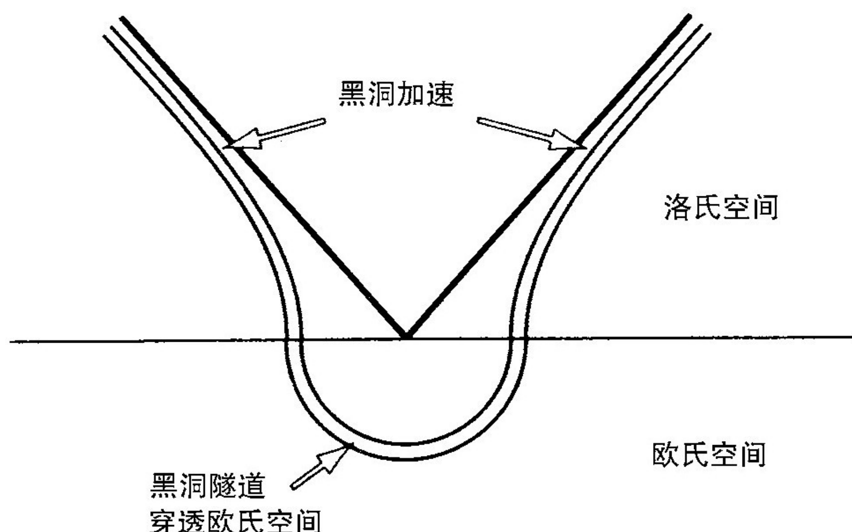


图3.15　还可以利用半张欧氏图和半张洛氏图的连接来描述一对黑洞的隧道穿透的产生

人们可以想象，黑洞在创生之后相互远离并进入无磁场的区域。然后可以把每个黑洞当作处于渐近平坦空间之中而分别处理。人们可以把任意大量的物质和信息抛入每个黑洞。这些黑洞辐射并丧失质量。然而，由于不存在带磁荷的粒子，所以它们不会失去磁荷。这样，它们最终就回到其原先的状态，质量比磁荷稍大一些而已。然后人们可以把这两个黑洞弄到一起使之相互湮灭。其湮灭过程可认为是对产生的时间反演。这样，这可由欧氏解的上半部和洛氏解的下半部相连接来描述。在对产生和对湮灭之间的一段很长的洛氏阶段中，黑洞相互离开，吸积物质，然后再返回到一块。但是引力场的拓扑是欧氏恩斯特解的拓扑。这就是$S^2 \times S^2$减去一点（图3.16）。

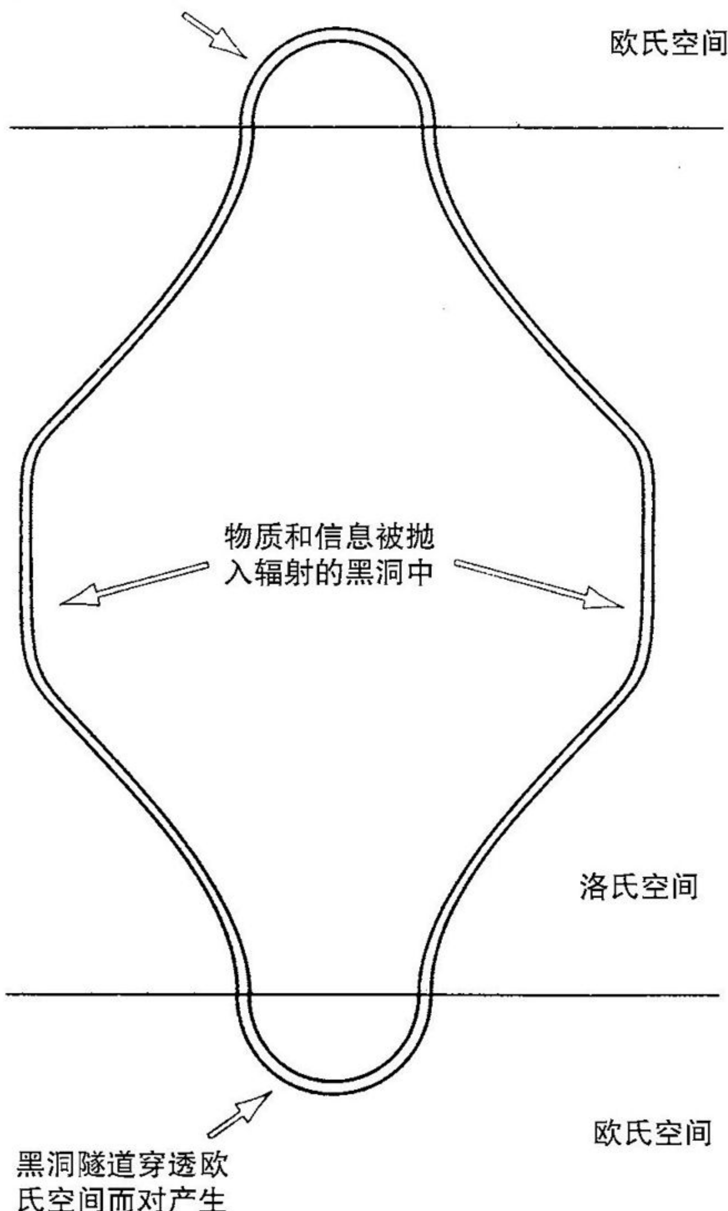


图3.16　黑洞对由于隧道效应产生而且最终又由于隧道效应湮灭

人们也许会担忧，由于在黑洞湮灭时其视界面积会消失，从而推广的热力学第二定律会被违反。然而，人们发现在恩斯特解中的加速视界的面积比没有对产生时所具有的面积更小。由于在两种情形下加速视界的面积都是无限大，因此这是一项相当精微的计算。尽管如此，在相当

确定的意义上说，其面积差是有限的，并且等于黑洞视界面积加上有对产生以及没有对产生的解的作用量之差。这可以这么理解，对产生是零能过程，具有对产生的哈氏量和不具有对产生的哈氏量相同。我非常感谢赛蒙·罗斯和盖瑞·霍罗维茨为这次讲演及时地计算出这一减小量。这真是一桩奇迹——我是指结果，而不是他们得到的过程——它使我信服，黑洞热力学决非低能下的近似。我相信，即使我们必须进入量子引力的更基本理论，引力熵也绝不会消失。

人们从这一理想实验看到，当时空的拓扑和平坦闵可夫斯基空间的不同时，就会得到内禀引力熵以及信息丧失。如果对产生的黑洞比普朗克尺度大，则视界外的每一处的曲率都比普朗克尺度小。这表明我忽视三阶或更高阶的微扰项所引起的近似应是可靠的。这样，在黑洞中信息会丧失的结论应是可信的。

如果在宏观黑洞中信息丧失，那么它也应在因度规量子起伏出现的微观的虚黑洞过程中丧失。人们可以想象粒子和信息会落入这些黑洞并丧失掉。也许这里正是奥秘之所在。像能量和电荷这样的和规范场相耦合的量是守恒的，但是其他信息以及全局的荷会被丧失。这对于量子理论而言具有深远的含义。

人们通常假定，一个处于纯粹量子态的系统，以一种幺正的方式通过一系列纯粹量子态而演化。但是，如果通过黑洞的出现和消失而引起信息丧失，则不存在幺正演化。相反地，信息丧失意味着，在黑洞消失之后，终态就变成所谓的混合量子态。这可被认为是不同纯粹量子态的一个系综，每一纯态各具有自己的概率。但是，因为任何一种状态都不确定，不能利用和任何量子态干涉的办法把这种终态的概率减小到零。这表明引力在物理中引进了一种新水平的不确定性，这种不确定性超越于通常和量子理论相关的不确定之上。我将在下一次讲演（第5章）中指出，我们或许已经观测到这种额外的不确定性。这表示科学决定性论的终结，我们不能确定地预言未来。看来上帝在它的袖子里仍有一些令人无法捉摸的诡计。



图3.17

第4章　量子理论和时空

罗杰·彭罗斯

量子理论（QT），狭义相对论（SR），广义相对论（GR）以及量子场论（QFT）是20世纪的伟大的物理理论。这些理论不是相互独立的：广义相对论是基于狭义相对论的基础上建立的，而量子场论是由狭义相对论和量子理论结合而成（见图4.1）。

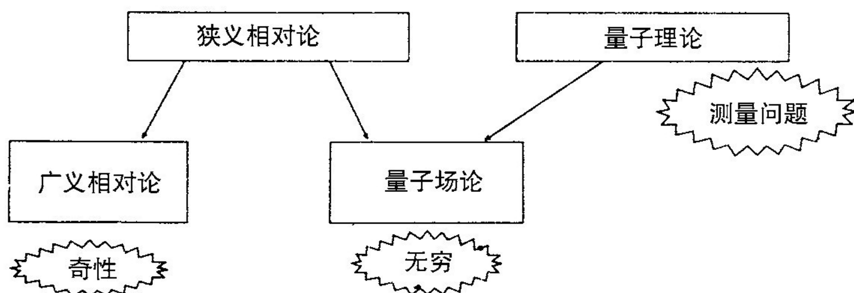


图4.1　20世纪的伟大物理理论以及它们的基本问题

有人说过，量子场论是迄今最精确的物理理论，它大约准确到10^{-11}。然而，我愿意指出，在一种确定的意义上，现在广义相对论被检验过，其准确性达到10^{-14}（而且这个精度显然是仅仅受限于地球上的时钟的精度）。我是指胡尔瑟—泰勒双脉冲量PSR 1913＋16，这是一对相互公转的中子星，其中之一为脉冲星。广义相对论预言，因为引力波辐射引起能量丧失，其轨道会缓慢缩小（而且周期缩短）。这个现象的确被观测到，而运动的整个描述，在一端是牛顿轨道，中间范围是广义相对论修正，而在另一端轨道因引力辐射而加速，这一切合并起来和广义相对论相符（我把牛顿理论归并到广义相对论中去），它在20年的积累的时期里达到上面提到的令人印象深刻的精确度。现在他们因为发现这个系统而理所当然地得到了诺贝尔奖。量子理论者总是声称，由于他们理论的准确性，应该是改造广义相对论以适合他们的框架，但是我现在却认为量子场论应该赶上来才对。

虽然这四种理论都是极其成功的，但它们并非没有问题。量子场论

的问题是，只要你一计算多连通的费因曼图，其答案便为无限大。这些无穷大必须用理论的重正化步骤将其扣除或缩小。广义相对论预言了时空奇性的存在。在量子理论中有所谓的“测量问题”——我将要描述之。人们可以认为，这些理论的各种问题的解决有赖于这一事实，即它们各自都不是完备的。例如，许多人预料量子场论也许能以某种方式“抹平”广义相对论的奇性。量子场论中的发散问题可以部分地由广义相对论的紫外切断所解决。类似地，我相信当广义相对论和量子理论适当地结合成某种新理论之时，最终能解决测量问题。

现在我想谈谈黑洞中的信息丧失，我断言它和最后那个问题有关系。我几乎完全同意史蒂芬有关这些所说的一切。但是史蒂芬把因黑洞引起的信息丧失当作物理学中的额外不确定性，并超越于量子力学的不确定性之上，而我却把它当作一种“互补的”不确定性。让我解释一下我的想法。在一个具有黑洞的时空中，利用时空卡特图的构造，人们可以看到信息丧失何以发生（图4.2）。

“入信息”是在过去零性无穷$\mathcal{I}^-$上给定，而“出信息”是在未来零性无穷$\mathcal{I}^+$上给定。人们会说，当信息落入黑洞的视界时丧失掉了，但是我宁愿认为当它遇到奇性时丧失掉。现在考虑一个物体坍缩成黑洞，随之黑洞因霍金辐射而蒸发。（人们肯定要足够耐心才能等待它的发生——也许比宇宙的生命还要长！）我同意史蒂芬的观点，在这一坍缩和蒸发的图景中信息丧失了。我们还能画出这个整体时空的卡特图（图4.3）。

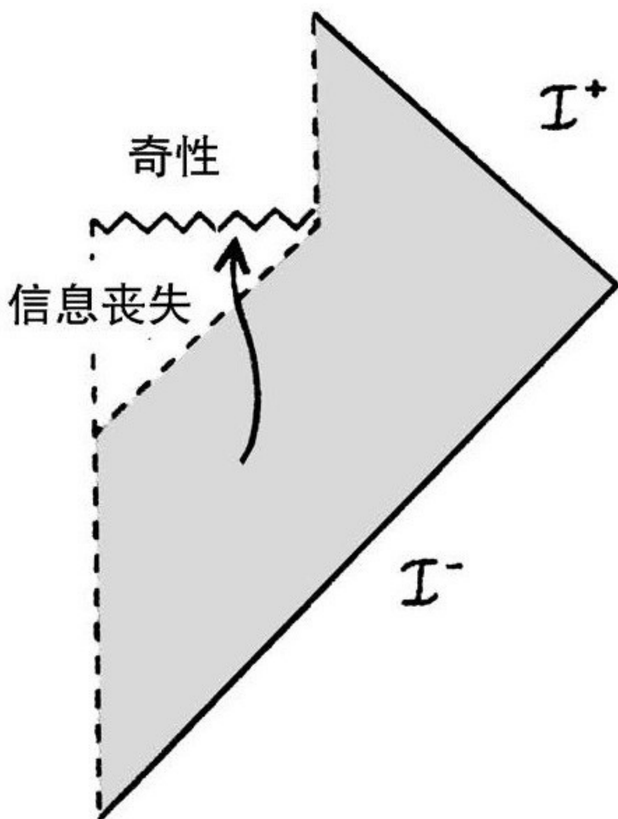


图4.2　黑洞坍缩的卡特图

黑洞中的奇性是类空的并具有巨大的外尔曲率，这和我前面讲演的讨论（第2章）相符。在黑洞蒸发时刻，从奇性残余的一块逃出一点信息是可能的（由于这残余的奇性处于未来的外界观察者的过去，其外尔曲率很小甚至为零），但是这种获取的微小信息比在坍缩中丧失的小得太多了（我在这儿是考虑黑洞最后消失的任何合理的图景）。如果我们做一个理想实验，把这个系统封闭在一个大盒子之中，我们可以考虑盒子之中物质的相空间演化。相空间中对应于存在一个黑洞情形的区域，其物理演化的轨道会收敛，伴随这些轨道的体积会收缩。这是由于信息丧失到黑洞奇性中去了。这个收缩和通常经典力学中的刘维尔定理直接冲突，这个定理说，相空间的体积保持常数。（这是一道经典定理。严格地讲，我们必须考虑希尔伯特空间中的量子演化。那么，刘维尔定理的违反就对应于非幺正演化。）这样，黑洞时空违背这个守恒。然而，在我的图景中，这个相空间体积丧失可由“自发”量子测量过程所平衡，可在测量中得到信息并且增加相空间体积。这就是为何，我把由黑洞信

息丧失引起的不确定性认为是量子理论中的不确定性的“互补”：这是一个问题的两个方面（见图4.4）。

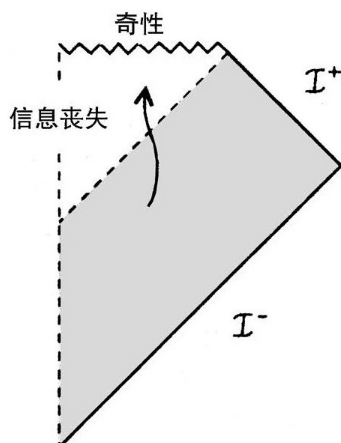


图4.3　黑洞蒸发的卡特图

人们可以讲，过去奇性携带很少信息，而未来奇性携带大量信息。这就是热力学第二定律的根基。这些奇性中的非对称也和测量过程中的非对称相关联。这样，让我们下一步转到量子理论中的测量问题上来。

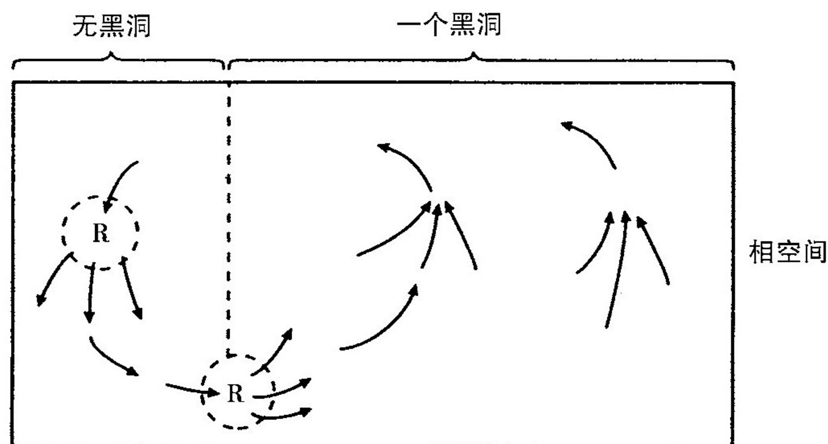


图4.4　当黑洞存在时发生相空间体积丧失。它可由波函数坍缩R引起的相空间体积的重新获得而得到平衡

可以利用双缝问题来阐释量子理论的原理。用一束光照射到带有两个缝A和B的一个不透明屏障上。在后面的屏幕上，它会产生明暗带干涉模式。单独的光子会到达屏幕的分立点上，但是由于干涉，光子达不到

屏幕上的一些点。令p为这样的一点——尽管如此，只要其中的一个缝隙被遮住，光子就能到达该处。不同的可能性有时相互抵消，这种性质的相消干涉是量子力学最令人迷惑的特征。我们按照量子力学的叠加原理来理解它。叠加原理是说，如果路径A和B都是光子可能通过的，而相应的光子态表示为|A〉和|B〉，而且我们假定，这些都是光子到达p要经过的，它首先通过一条缝或者首先通过另一条缝，那么z|A〉+ω|B〉也是可能的态，此处ω和z是复数。

由于ω和z是复数，所以以任何方式认为它们是概率都是不合适的。光子态正是这种复叠加。量子系统的幺正演化（我将其称为U）维持这种叠加：如果zA_0+wB_0是在时刻t的一个叠加，那么在时间t之后，它会演化成zA_t+wB_t，此处A_t和B_t分别代表时刻t的两种态的演化。对量子系统进行测量，量子的不同选择被放大，给出可以区分的输出，这里发生了不同类型的“演化”，它叫作波矢量的减缩或“波函数坍缩”（我将其称为R）。只有当系统被“测量”时，概率才进入角色，两个事件发生的相对或然率是$|z|^2$：$|\omega|^2$。

U和R是非常不同的过程：U是决定性的，线性的，（在配置空间中）定域的以及时间对称的。R是非决定性的，肯定是非线性的，非定域的，以及时间非对称的。量子力学中的这两个基本演化过程之间的差异是非常显著的，极不可能把R归结成U的一种近似（虽然人们经常企图这么做）。这就是“测量问题”。

特别是，R为时间非对称的。假定光子源L有一束光照射到一个半镀银的镜子上，镜子和下垂方向成45°角，在镜子后面放置一个检测器D（图4.5）。

因为镜子只是半镀银的，所以透射和反射态的叠加权重相等。这就导致任何单独光子有一半的概率激活检测器而不被实验室地板吸收。这个50%就是以下问题的答案：“如果L发射光子，D接收到它的概率是多少？”规则R决定了这类问题的答案。然而，我们还可以问这样的问题：“如果D接收到光子，那么它是从L发射出的概率是多少？”人们也许会认为我们可以用和前面相同的方法得出概率。U是时间对称的，那么这点对R也适用吗？事实上，对这个问题的答案由相当不同的考虑所确定，也就是热力学第二定律。此处把这个定律应用到墙上，其非对称性归根到底是因为宇宙在时间上非对称引起的。阿哈拉诺夫、柏格曼和列波维奇（1964）曾经指出，如何把测量问题置于时间对称的框架中去。

根据这种规划，R的时间非对称是由将来和过去的非对称边界条件引起的。这也是格雷菲斯（1984），翁纳斯（1992）以及盖尔曼和哈特尔（1990）所采用的一般框架。由于第二定律的起源可回溯到时空奇性结构的非对称性，这种关系暗示着量子力学的测量问题和广义相对论中的奇性问题是相关的。回顾一下我在上一次讲演中提出的，初始奇性具有非常微小的信息以及零值的外尔张量，而终结奇性（或者无穷）携带有大量信息以及发散的外尔张量（在奇性的情形下）。

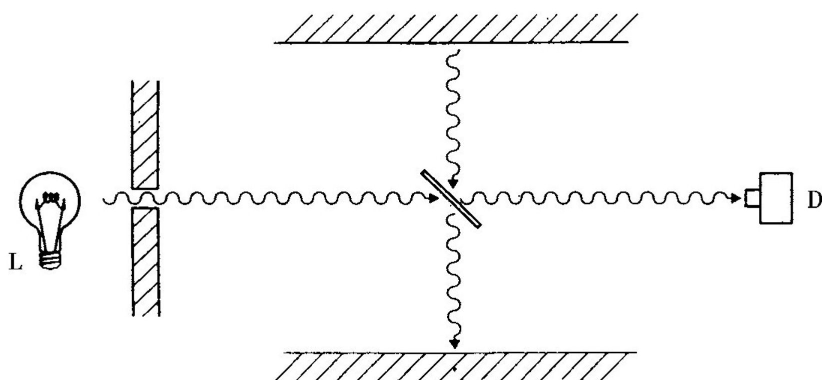


图4.5　这个简单的实验用来解释起源于R中的量子概率不能适用于时间反演反向

为了在使我考虑量子力学和广义相对论关系之时立场明确，我现在最好讨论一下我们所说的量子实在是什么：究竟态矢量是“真实的”，或者密度矩阵是“真实的”？密度矩阵代表我们对态的不完整认识，并因此包含两类概率——经典概率以及量子概率。我们可以把密度矩阵写成

$$D=\sum_{i=1}^{N}P_i|\psi_i\rangle\langle\psi_i|,$$

此处pi是概率，它们是实数并服从$\Sigma p_i=1$，而每一个$|\psi_i\rangle$都进行了归一化。这是态的加权概率混合。这儿$|\psi_i\rangle$没必要是正交的，而N可以比希尔伯特空间的维数还大。让我们作为一个例子，来考虑一个爱因斯坦—帕多尔斯基—罗逊类型的实验，一个自旋为零的粒子，处于实验的中心，它衰变成两个自旋为二分之一的粒子。这两个粒子沿相反方向飞离并在“此处”和“彼处”被检测到，“彼处”可以远离“此处”，譬如讲在月亮上。我们把态矢量写成一个概率的叠加

$$|\psi\rangle=\{|上此\rangle|下彼\rangle-|下此\rangle|上彼\rangle\}/\sqrt{2} \tag{4.1}$$

此处|上此〉是此处一个粒子其自旋朝上的态，等等。现在假定在月亮上进行了Z方向的自旋测量，而我们并不知道这个结果。那么，态在此处就由密度矩阵来描述

D＝1/2|上此〉〈上此|＋1/2|下此〉〈下此|。

（4.2）

另一种可能是，在月亮上也许进行了x方向的自旋测量。态矢量（4.1）可重写成

$$|\psi\rangle = \{|左此\rangle|右彼\rangle - |右此\rangle|左彼\rangle\}/\sqrt{2},$$

我们得到的合适的密度矩阵为

D＝1/2|左此〉〈左此|＋1/2|右此〉〈右此|，

它事实上和（4.2）相等。然而，如果态矢量描述实在，那么密度矩阵就没讲发生了什么。它只不过在假定你不知道“彼处”发生什么的情形下给出“此处”测量的结果。特别是，我可能收到一封从月亮来的通知我有关那儿测量的性质和结果的信。这样，如果我（在原则上）能得到这个信息，则我必须用一个态矢量来描述这整个（纠缠的）系统。

一般讲来，对于给定的密度矩阵，存在大量的把它写成态的概率叠加的不同方式。况且，按照休斯顿，约莎和伍特斯（1993）最近的一道定理，对于以这种方式产生的密度矩阵，正如同爱因斯坦—帕多尔斯基—罗逊系统的“此处”部分，对于它作为概率态混合的任何解释，在“彼处”总存在一个“测量”，这个“测量”刚好赋予“此处”的密度矩阵以特殊的概率混合解释。

另一方面，人们也许论断道，密度矩阵描述实在，以我的理解，当黑洞出现时，这和史蒂芬的观点相接近。

约翰·贝尔有时把态矢量的减缩过程的标准描述称作FAPP，这是“为所有实用目的”的缩写。按照这个标准步骤，我们可以把总态矢量写成

|ψ总〉＝ω|上此〉|？〉＋z|下此〉|？'〉，

此处|？〉描写环境中在我们测量外的事物。如果环境的信息丧失，那么我们最多只能用密度矩阵

$$D=|\omega|^2|上此〉〈上此|+|z|^2|下此〉〈下此|。$$

只要不能从环境恢复信息，我们“也可以”（FAPP）认为态是分别具有概率$|\omega|^2$和$|z|^2$的|上此〉或|下此〉。

然而，由于密度矩阵没有告诉我们它是由哪些态构成的，我们还需要另外的假设。为了解释这一点，让我们考虑薛定谔猫的理想实验。它描写关在盒子中的猫的状态，一个光子被发射出并遭遇到一面半镀银的镜子，而光子波函数的穿透部分遭遇到一个检测器，如果它检测到光子，就自动开枪把猫枪毙。如果它没有检测到光子，则猫安然无恙。（我知道史蒂芬不批准虐待猫，即便是在理想实验之中！）这个系统的波函数是这两种不同可能性的叠加

$$\omega|死猫〉|开枪〉+z|活猫〉|不开枪〉，$$

此处|开枪〉和|不开枪〉是被当作环境状态。

按照量子力学的多世界观点这应是（不管环境）

$$\omega|死猫〉|知道猫死〉+z|活猫〉|知道猫活〉，\tag{4.3}$$

此处|知道…〉态是实验者的头脑状态。但是，为什么不允许我们去感知像这类的宏观叠加，而不仅仅是宏观的可能性“猫死”或“猫活”呢？例如，在$w=z=1/\sqrt{2}$的情形，我们能把态（4.3）写成叠加

$$\begin{aligned}\{&(|死猫〉+|活猫〉)\\&\quad\times(|知道猫死〉+|知道猫活〉)\\&+(|死猫〉-|活猫〉)\\&\quad\times(|知道猫死〉-|知道猫活〉)\}/2\sqrt{2}\end{aligned}$$

这样，除非我们有理由把诸如（|知道猫死〉+|知道猫活〉）$/\sqrt{2}$

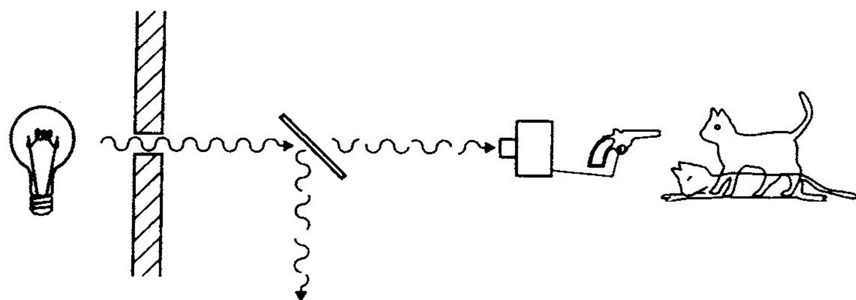
的“感知态”排除在外，我们对问题的解决没有任何进展。

这同样的问题也适用于环境，而且（例如，又是在$w=z=1/\sqrt{2}$的情形下）我们能把密度矩阵写成叠加

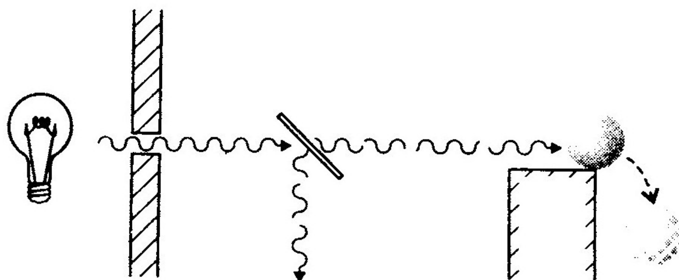
$$D=\frac{1}{4}(|\text{死猫}\rangle+|\text{活猫}\rangle)(\langle\text{死猫}|+\langle\text{活猫}|)$$
$$+\frac{1}{4}(|\text{死猫}\rangle-|\text{活猫}\rangle)(\langle\text{死猫}|-\langle\text{活猫}|),$$

这使我们得知，这个“环境离析”观点并没有解释为何猫非活即死。

在此我不想进一步讨论意识或离析的问题。以我的意见，测量问题的答案在于他处。我现在认为，当广义相对论被涉及时，不同时空几何的叠加出了某种毛病。也许两个不同几何的叠加是不稳定的，而且衰变到这两个中的一个。例如，这种几何也许是活猫或死猫的时空。我把这种往一种或另一种可能的衰变称为客观减缩，我喜爱这个名字因为它有一个美妙的缩写（OR）。普朗克长度10_{-33}厘米和它有何关系呢？自然决定两个几何是否明显不同的判据与普朗克尺度有关，而这就定下了减缩到不同可能发生的时间尺度。



（i）



（ii）

图4.6　薛定谔猫（i）及其更人道的版本（ii）

我们可以让猫好好休息一下。再回到半镀银镜子的问题上来，但是这回随着检测到光子，使一大块质量从一处运动到另一处（图4.6）。

如果我们把物体细心地置于悬崖的边缘，只要一个光子便能把它推下去，我们就不必担忧检测器上的态减缩的问题！被移动的质量多大才足以使两种可能性的叠加不稳定呢？正如我在这儿建议的，引力能提供答案（参阅彭罗斯1993，1994；还可参阅狄奥西1989，吉拉迪、格拉西和雷米尼1990）。根据提供的方案，为了计算衰变时间，考虑把一个物体情状从它和另一情状重合下分开，并克服另一情状物体的引力场，直到两者总质量等于各自质量的叠加为止所耗费的能量E。我提议这个叠加的态矢量坍缩的时间尺度具有数量级

$$T \sim h/E。 \quad (4.4)$$

对于一个核子，时间尺度将近10^8年，所以在存在的实验中看不到

不稳定性。然而，对于尺度为10^{-5}厘米的水滴，其坍缩需要大约两个小时。如果水滴有10^{-4}厘米，坍缩需要大约十分之一秒，而对于10^{-3}厘米，坍缩就只需要10^{-6}秒左右。还有，这是当这一团和环境隔离开的情形；物质在环境中的运动会促进衰变。这一类解决量子理论测量问题的方案会遇到能量守恒和定域性的问题。但是在广义相对论中引力能量中存在内在的不确定性，尤其是当考虑到这些对叠加态将如何贡献之时。广义相对论中的引力能量不是定域的：引力势能非定域地（负性地）对总能量贡献，而引力波可从系统携带走（正性的）非定域的能量。在一定情形下，甚至平坦时空能对总能量有贡献。两个质量定位的叠加态中的能量不确定性，正如此处所考虑的（由于海森堡不确定性）和衰变时间（式4.4）相协调。

问答

问：霍金教授提到，引力场在一些方面比其他场更特殊。你对此有何看法？

答：引力场肯定是特殊的。这个学科的历史颇具讽刺意味：牛顿从引力论来开创物理学，而引力论又是其他相互作用的原始典范。但是现在发现引力在事实上和其他相互作用在本性上有差异。引力是仅有的影响因果性的相互作用，考虑到黑洞和信息丧失，它具有深远的含义。

第5章　量子宇宙学

史蒂芬·霍金

我将在第三次讲演中转向宇宙学。宇宙学在过去被认为是伪科学并且是一些物理学家的保留地，供这些在早年也许做过一些有用的工作，但在晚年进入玄秘状态的人栖息。有两种原因导致这种看法。第一种是过去几乎没有任何可靠的观测。的确，直到20世纪20年代左右，仅有的重要的宇宙学观察就是夜空是黑的。但是人们并没有领会到它的意义。然而，近年来宇宙观测的范围和质量随着技术的发展而得到巨大的改善。这样，说宇宙学没有观测基础，进而反对它作为科学的说法就不再站得住脚了。

然而，还存在第二种而且更严重的反对。宇宙学除非对初始条件做了一些假设，它对宇宙不能做任何预言。没有这种假设，则人们所能说的是，事情之所以像现在这样，是因为在更早先阶段它是那种样子。而许多人相信，科学只应关心制约宇宙如何随时间演化的定域的定律。他们会觉得，确定宇宙如何启始的宇宙边界条件是形而上学或宗教的问题，而不是科学的问题。

这情形因罗杰和我证明的定理而恶化。这些定理指出，根据广义相对论，在我们的过去应该有奇性。场方程在奇性处无法定义。这样广义相对论导致了自身的失效：它预言它不能预言宇宙。

虽然许多人欢迎这个结论，我对之却极度不安。如果物理定律可以在宇宙的开端失效，为何不能在任何地方失效？在量子理论中有一条原则，只要不是被绝对禁戒的事物都是会发生的。一旦人们在路径积分中允许奇性历史参与，它们就会随时随地发生，而预见性便会消失殆尽。如果在奇性处物理学定律失效，那么在任何地方都会失效。

科学理论的唯一出路是，物理定律必须处处成立，包括宇宙的开端也不例外。人们可把这些认为是民主原则的胜利：为何宇宙的开端可以免除适合他处的定律的制约？如果所有点都是平等的，就绝不能让一些点比其他点更平等些。

为了实施物理定律在任何地方都有效的观念，人们应该让路径积分只对非奇性度规求和。人们在通常的路径情形下得知，测度更集中于不可微的路径。但是在某些合适的拓扑中，这些路径是光滑路径的完备化，并具有定义完好的作用量。类似的，人们会预料到，量子引力的路径积分应该对光滑度规的完备化空间求和。路径积分不能包括的是奇性的度规，因为它的作用量没有定义。

我们看到，在黑洞的情形中，路径积分应对欧氏也就是正定度规求和。这意味着像史瓦西解这样的黑洞的奇性在欧氏度规中不出现，欧氏度规并没有到达视界里面。相反的，视界像是极坐标的原点。因此欧氏度规的作用量是完好定义的。人们可以把这个认为是宇宙监督的量子版本：奇性处结构的破坏不应影响任何物理测量。

因此，量子引力的路径积分看来应该对非奇性欧氏度规求和。但是对这些度规上应赋予什么样的边界条件，存在两个也只有两个自然的选择。第一个是度规在紧致集之外要趋近于平坦的欧氏度规。第二种可能性是在紧致和没有边界的流形上的度规。

量子引力路径积分的自然选取

1.渐近平坦的欧氏度规。

2.没有边界的紧致度规。

第一类渐近欧氏度规对于散射计算显然很适合（图5.1）。人们在这些度规中从无穷把粒子发进来，再在无穷观察跑出什么来。所有的观察都在无穷进行，在无穷处的背景度规是平坦的，可以以通常方式把场的小起伏解释成粒子。人们不必询问在中间的相互作用区域发生了什么。这就是为何人们让相互作用区域的路径积分对所有可能历史求和，也就是对所有渐近欧氏度规求和。

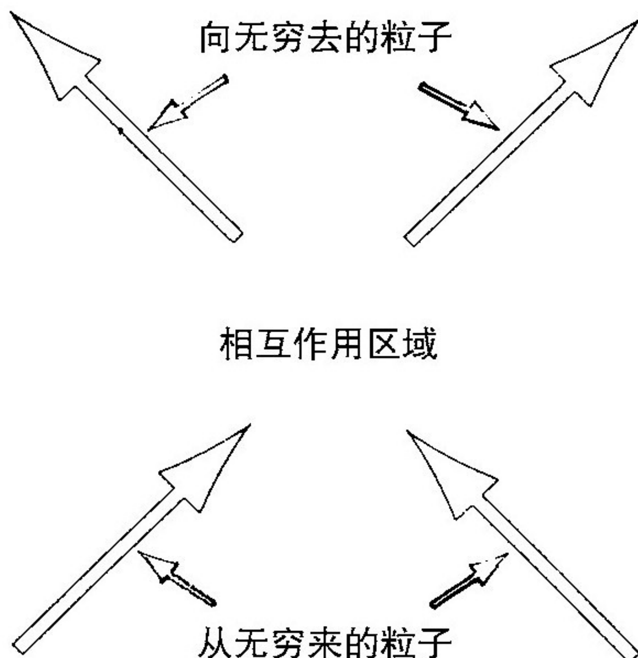


图5.1 在散射计算中，我们在无穷测量入射和出射粒子，因此我们要研究渐近欧氏度规

然而，人们在宇宙学中有兴趣在有限区域而不是在无穷进行测量。我们处于宇宙之中，而非从外界来窥视宇宙。为了看到这种差异，首先让我们假定，宇宙学的路径积分是对所有渐近欧氏度规求和。那么，对于在有限区域的测量的概率存在两种贡献。第一种来自于连通的渐近欧氏度规。第二种来自于非连通的度规，它由一个包含测量区域的紧致时空和一个与之相分离的渐近欧氏度规组成（图5.2）。人们不能把非连通度规从路径积分中排除，因为它们可由连通度规来近似，在此度规中不同的部分可由具有可以忽略的作用量的细管或虫洞连接起来。

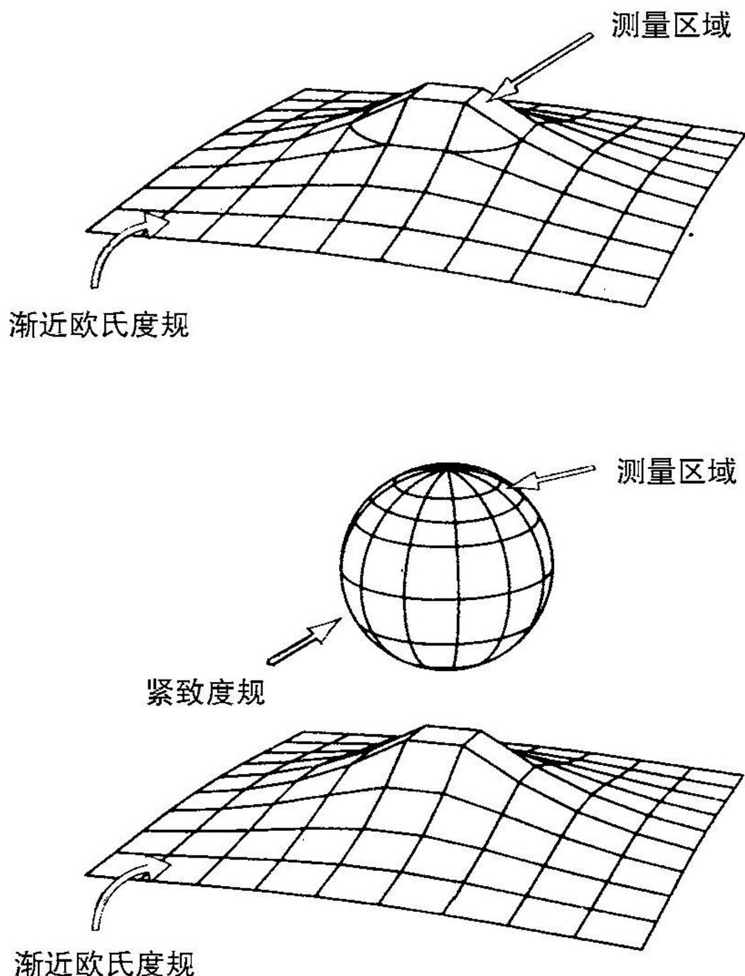


图5.2　宇宙测量是在有限区域进行，所以我们必须考虑两种类型的渐近欧氏度规：连通的（上）和非连通的（下）

由于时空的非连通的紧致区域不和无穷连接，而测量却是在无穷进行的，所以紧致区域不影响散射计算。但是它们会影响宇宙学中的测量，因为它是在有限区域进行的。的确，这种非连通度规的贡献远远压倒来自连通的渐近欧氏度规的贡献。这样，人们即便把宇宙学的路径积分对所有渐近欧氏度规求和，其效应和对所有紧致度规求和几乎完全相同。因此，对宇宙学的路径积分，看来更自然的是取对所有无边界的紧致度规求和，正如哈特尔和我在1983年所提议的那样（哈特尔和霍金，1983）。

无边界假设（哈特尔和霍金）

量子引力的路径积分是对所有紧致欧氏度规求和。

人们可以把它重述为“宇宙的边界条件是它没有边界。”

我在这次讲演的以下部分要指出，这个无边界假设似乎能解释我们生活于其中的宇宙。那是一个各向同性的、均匀的、具有微小微扰的膨胀宇宙。我们可以在微波背景的起伏中观察到这些微扰的谱和统计。这些结果迄今和无边界假设相一致。当微波背景的观测被延伸到更小的角度范围时，这种观察便成为无边界假设和欧氏量子引力整个学说的试金石。

为了使用无边界假设来作假设，引进能用以描述宇宙在一个时刻的状态的概念很有助益。考虑时空流形M包含一个嵌入的三维流形Σ的概率，这三维流形的度规用h_{ij}来表示。它由一个对所有在M上的度规g_{ab}的路径积分来计算，在此要求度规g_{ab}在Σ上的导出度规为h_{ij}。

$$\text{在}\sum\text{上导出度规}h_{ij}\text{的概率}=\int_{M\text{上在}\sum\text{导出}h_{ij}\text{的度规}}\mathrm{d}[g]\mathrm{e}^{-I}$$

如果M是单连通的，这正是我要假设的，则面Σ就把M分成两部分：M^+和M^-（图5.3）。在这种情形下，Σ具有度规h_{ij}的概率是可以因式分解的。它是两个波函数Ψ^+和Ψ^-的乘积。它们分别是从对所有M^+和M^-上的度规求和的路径积分得出，而这些度规在Σ上导出给定的三维度规h_{ij}。

$$h_{ij}\text{的概率}=\Psi^+(h_{ij})\times\Psi^-(h_{ij})$$

此处

$$\Psi^+(h_{ij})=\int_{M^+\text{上在}\sum\text{上导出}h_{ij}\text{的度规}}\mathrm{d}[g]\mathrm{e}^{-I}$$

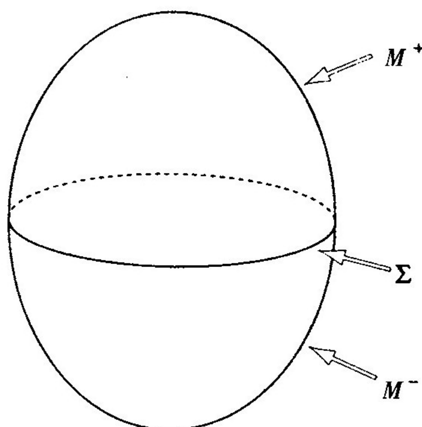


图5.3　表面Σ把紧致的、单连通的流形M分割成M⁺和M⁻两部分

在大多数情形下，这两个波函数相等，所以我将把上标＋和-去掉。Ψ被称作宇宙的波函数。如果还有物质场，则波函数还依赖于它们在Σ上的值φ_0。但是由于在一个闭合的宇宙中不存在一个特别优越的时间坐标，所以波函数并不显明地和时间有关。无边界假设的含义是，宇宙的波函数是由一个对在紧致流形M⁺上的场求和的路径积分给出，这些流形的仅有边界是表面Σ（图5.4）。该路径积分是对在M⁺上所有度规和物质场求和，而这些度规和场在Σ和h_{ij}以及物质场φ_0相一致。

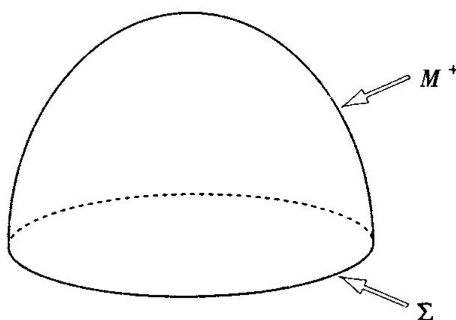


图5.4　波函数由在M⁺上的一个路径积分给出

人们可以把表面Σ的位置描述成Σ上的三坐标x_i的函数τ。但是由路径积分定义的波函数不能依赖于τ或者坐标x_i的选取。这表明波函数Ψ必须服从四个泛函微分方程。其中三个方程叫作动量约束。

动量约束方程

$$\left(\frac{\partial\psi}{\partial h_{ij}}\right)_{ij}=0$$

它们表达了这样的事实，即对于相互之间可由坐标变换得到的不同三度规h_{ij}，其波函数必须相同。第四个方程称为惠勒—德威特方程。

惠勒—德威特方程

$$\left(G_{ijkl}\frac{\partial^2}{\partial h_{ij}\partial h_{kl}}-h^{\frac{1}{2}}\ {}^3R\right)\psi=0$$

它对应于波函数与τ无关。人们可以把它认为是宇宙的薛定谔方程。但是，因为波函数不显明地依赖于时间，所以没有时间导数项。

人们为了估计宇宙的波函数，正如在黑洞的情形，可以利用路径积分的鞍点近似。人们在流形M^+上找到满足方程的欧氏度规g_0，并要求g_0在边界Σ上导出度规h_{ij}。然后，人们可把作用量围绕着背景度规g_0做级数展开

$$I[g]=I[g_0]+\frac{1}{2}\delta gI_2\delta g+\cdots$$

和前面一样，微扰线性项消失。平方项可认为是背景中的引力子的贡献，而更高阶项是引力之间的相互作用。当背景的曲率半径和普朗克尺度比较大时，这些可以不管，因此，

$$\psi\approx\frac{1}{\left(\det I_2\right)^{\frac{1}{2}}}e^{-I[g_0]}$$

人们可从一个简单的例子看到波函数像什么样子。考虑一种没有物质场的情形，这儿只存在一个正的宇宙常数Λ。让我们取Σ为一个三维球并且h_{ij}为半径a的标准三维球度规。然后以Σ为边界的流形M^+可取为四维球。满足场方程的度规是具有半径1/H的四维球的一部分，此处$H^2=\Lambda/3$。其作用量为：

$$I=\frac{1}{16\pi}\int(R-2\Lambda)(-g)^{\frac{1}{2}}\mathrm{d}^4x+\frac{1}{8\pi}\int K(\pm h)^{\frac{1}{2}}\mathrm{d}^3x$$

对于半径比1 H还小的三维球Σ，存在两个可能的欧氏解：M+可以比半球面少或者多（图5.5）。然而，可以论证道，人们应当取对应于少于半球面的那个解。

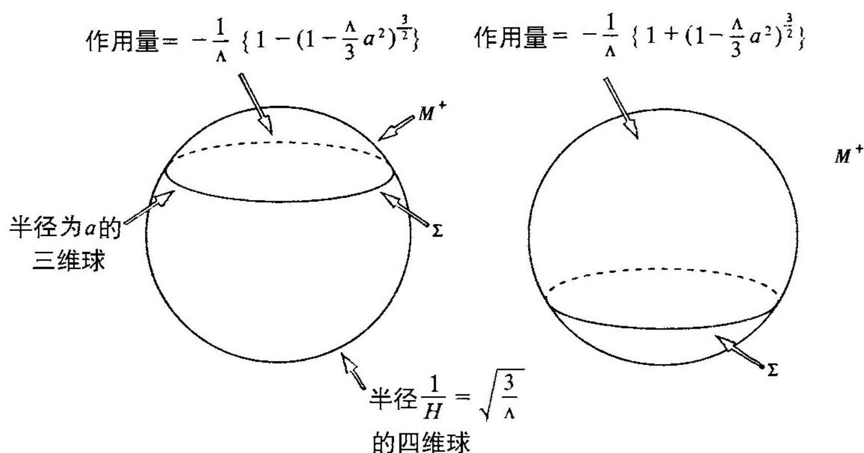


图5.5 具有边界Σ的两个可能的欧氏解M+，以及它们的作用量

下一张图（图5.6）标出了度规g_0的作用量对波函数的贡献。当Σ的半径比1/H小时，波函数以e^{a_2}的形式指数地增大。然而，当a比1/H还大时，我们可以对更小半径a的结果做解析连续，而得到非常快速振荡的波函数。

人们可对波函数做如下解释。具有Λ项和最大对称性的爱因斯坦实时解是德西特空间。它可以被作为一个旋转双曲面被嵌入五维闵可夫斯基空间中（见方框5.A）。人们可以把它考虑成一个闭合宇宙，这个宇宙从无限尺度收缩到一个极小半径，然后又呈指数地膨胀。这个度规可以写成带有尺度因子为coshHt的弗里德曼形式。代换τ＝it把cosh变成cos给出了具有半径1/H的四维球的欧氏度规（见方框5.B）。这样，人们得知，当波函数随三度规h_{ij}，以指数方式变化时，它就对应于虚时间欧氏度规。另一方面，波函数快速振荡对应于实时间洛氏度规。

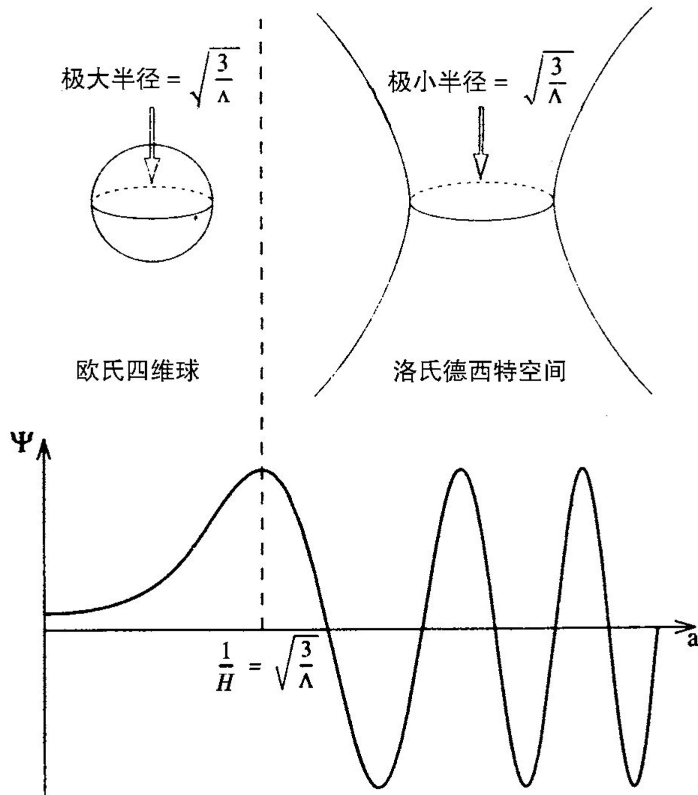
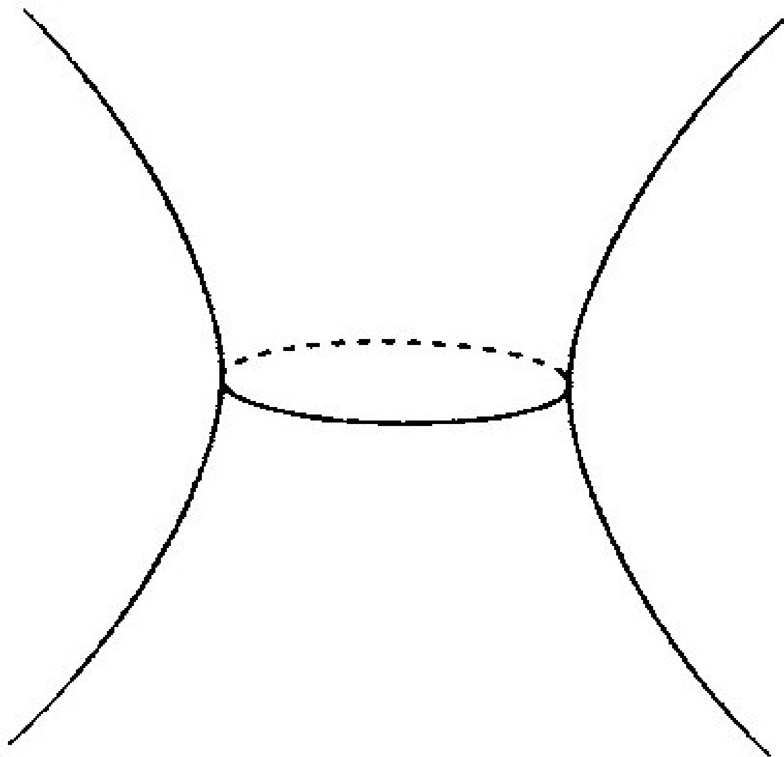


图5.6　波函数作为Σ的半径的函数

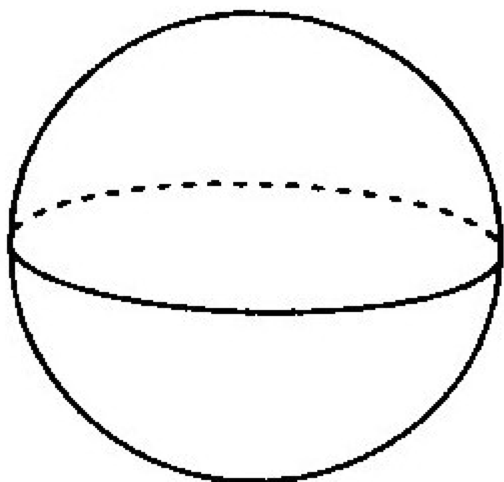
正如在黑洞对产生的情形，人们可以描述一个指数膨胀宇宙的自发创生。人们把欧氏四维球的下半部和洛氏旋转双曲面连接起来（图5.7）。和黑洞对产生的情形不同的是，人们不能说德西特宇宙是从一个预先存在的空间中的场能创生出来的。相反的，可以相当准确地按字面意义上说，宇宙是由无创生出来的：不仅仅是从真空出来，而根本是从绝对的无中出来，因为在宇宙之外没有任何东西。在欧氏范畴，德西特宇宙只不过是一个闭合的空间，正如地球的表面，只不过多了方框5.A.洛氏德西特度规

$$ds^2 = -dt^2 + \frac{1}{H^2}\cos h^2 Ht[dr^2 + \sin^2 r(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)]$$



方框5.B.欧氏度规

$$ds^2 = d\tau^2 + \frac{1}{H^2}\cos^2 H\tau[dr^2 + \sin^2 r(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)]$$



两维而已。如果宇宙常数比普朗克值小，欧氏四维球的曲率应该很小。这表明路径积分的鞍点近似是可靠的，而且不会因为我们忽视在非常高曲率下所发生的而影响宇宙波函数的计算。

人们还可以对不是完美的三维球度规的边界解场方程。如果三维球的半径比1/H小，则解为实的欧氏度规。和具有相同体积的完美的三维球相比较，作用量是实的而且波函数呈指数式衰减。如果三维球的半径比这个临界半径大，则存在两个复共轭解，而波函数将会随h_{ij}的微小变化而快速振荡。

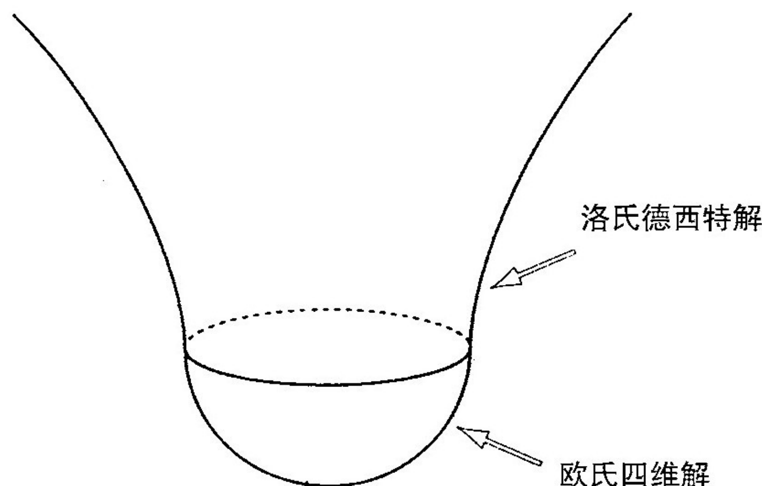


图5.7　用半个欧氏解和半个洛氏解连接来描述产生膨胀宇宙的隧道效应

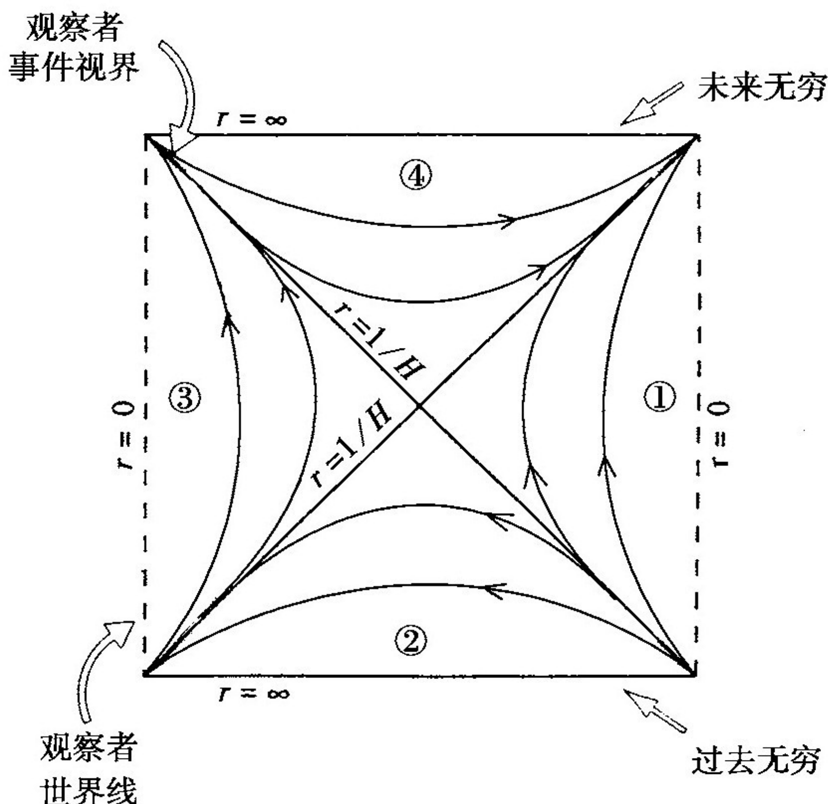
在宇宙中做的任何测量都可以按照波函数来表述。这样，无边界假设使宇宙学成为科学，因为人们可以预言任何观察的结果。我们刚才考虑的没有物质场只有宇宙常数的情形不对应于我们生活其中的宇宙。尽管如此，它是个有用例子，不仅因为它是一个简单的并能相当显明地解出的模型，而且我们将要看到，它对应于宇宙的早期阶段。

虽然从波函数看并不明显，但一个德西特宇宙和黑洞相当类似地具有热性。把德西特度规写成和史瓦西解相当类似的静态形式就能看到这一点（见方框5.C）。

在r＝1/H处有一表观奇性。然而，正如在史瓦西解的情形，人们用坐标变换可以把它排除，而它对应于一个事件视界。这可以从卡特—彭罗斯图上看到，它是一个正方形。左边的点垂直线代表球对称中心，在这儿二维球的半径r为零。另一个球对称中心由右边的点垂直线代表。在顶上和底下的水平线代表过去和将来的无穷，在这个情形下它们是类空的。从左上方到右下方的对角线是在左手对称中心的观察者过去的边界。这样，它可以称作事件视界。然而，一位世界线在未来无穷的其他地方终结的观察者具有不同的事件视界。这样，在德西特空间中事件视界是个人的事物。

方框5.C.德西特度规的静态形式

$$ds^2 = -(1-H^2r^2)dt^2 + (1-H^2r^2)^{-1}dr^2$$
$$+r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)$$



如果人们回到德西特度规的静态形式，并且令τ＝it便得到欧氏度规。在视界上有一表观奇性。然而，只要定义一个新的径向坐标并且在τ坐标以周期2π/H来等同，就得到一个规则的欧氏度规，它刚好是四维球。因为虚时间坐标是周期性的，所以德西特空间和在它之上的所有量子场的行为就好像它们具有温度H/2π似的。正如我们将要看到的，我们在微波背景的起伏中可以观察到这个温度的后果。人们还可以像处理黑洞那样，对欧氏德西特解的作用量进行论证。他会发现它具有内禀熵π/H^2，这正是事件视界面积的四分之一。这个熵又是因拓扑原因引起的：四维球的欧拉数为二。这表明在欧氏德西特空间中不可能有全局时间坐标。人们可以把这一宇宙熵解释成观察者对在他的事件视界之外的宇宙知识的缺失。

具有周期2π/H的欧氏度规

$$\Rightarrow \begin{cases} 温度=\dfrac{H}{2\pi} \\ 事件视界面积=\dfrac{4\pi}{H^2} \\ 熵=\dfrac{\pi}{H^2} \end{cases}$$

德西特空间不是我们生活于其中的宇宙的好模型，因为它是空的而且在呈指数地膨胀。我们观察到宇宙包含物质，而且我们从微波背景和轻元素丰度推出，它在过去必须更热更密得多。和我们观察一致的最简单的方案便是所谓的"热大爆炸"模型（图5.8）。在这个场景中，宇宙在充满具有无限温度的辐射的一个奇性启始。随着它的膨胀，辐射冷却而且能量密度降低。最后，辐射的能量密度比非相对性物质的密度还低，而膨胀变成物质占主导的了。然而，我们仍然可以在微波辐射的背景中看到辐射的残余，它具有大约比绝对零度高3K的温度。

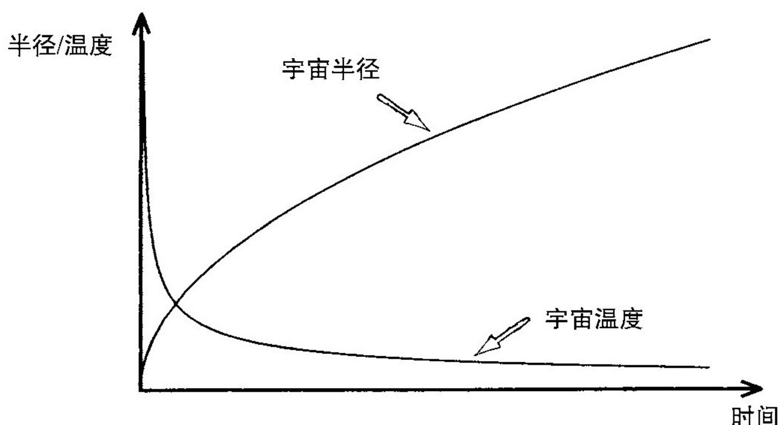


图5.8　在热大爆炸模型中宇宙半径和温度作为时间的函数

热大爆炸模型的麻烦正是所有宇宙学的麻烦，它没有初始条件的理论：它没有预言能力。因为广义相对论在奇性处失效，从大爆炸可以冒出任何东西来。这样，为何宇宙在大范围内是如此的均匀和各向同性，却还有诸如星系和恒星这样的局部无规性呢？为何宇宙是如此接近于重新坍缩和无限膨胀之间的分界线呢？为了使它像现状这么接近，早期的膨胀率必须不可思议地精确选定。如果在大爆炸后1秒其膨胀率小了10^{-10}，则宇宙在几百万年之后就应坍缩。如果它大了10^{-10}，宇宙就会在几百万年之后基本上是空的。在任何情形下都不会有足够时间让生命得

以发展。这样，人们要么必须求助于人存原理，要么必须寻找物理学的解释，说明宇宙为何是这种样子的。

热大爆炸模型不能解释为何：

1.宇宙几乎是均匀和各向同性的，但是却具有小微扰。

2.宇宙在以几乎刚好避免重新坍缩的临界率膨胀。

有些人宣布，所谓的暴涨能够使初始条件理论成为多余。其思想是宇宙在大爆炸时可以从几乎任意状态启始。在宇宙中具有合适条件的部分会出现叫作暴涨的指数膨胀时期。这个不仅使该区域尺度增加一个巨大的达到10^{30}或更多的倍数，并且还使该区域既均匀又各向同性，还使它以刚好避免再坍缩的临界速率膨胀。他们还声称只有在暴涨区域智慧生命才得以发展。因此，对我们的区域如此之均匀以及各向同性，还刚好以临界速率膨胀，不应感到惊讶。

然而，光用暴涨不能解释宇宙的现状。人们要看到这一点很容易，只要取现在宇宙的任何态并让它向时间的过去演化。假定它包含足够物质，则奇性定理表明，在过去存在有奇性。人们可以在大爆炸选取这个模型的初始条件作为宇宙初始条件。人们以这种方法可以指出，大爆炸处的任意初始条件能导致现在的任何状态。人们甚至不能争辩道大多数初始条件会导致像我们今天观察到的状态：无论是导致像还是不像我们宇宙的初始条件的自然测度都是无限的。所以人们不能断言何者测度更大些。

另一方面，我们看到在具有宇宙常数但没有物质场的引力情形，无边界条件会导致一个在量子理论极限内可被预言的宇宙。这个特殊的模型并不描述我们生活于其中的宇宙，我们的宇宙充满了物质而且具有零值或者非常小的宇宙常数。然而，人们可以抛弃宇宙常数并包括进物质场以得到一个更现实的模型。尤其是似乎需要一个具有势V（）φ的标量场V（）φ。我将假定V在V（）φ＝0时有一为零的极小值。简单的例子便是具有势$V=1/2m^2\varphi^2$的有质标量场（图5.9）。

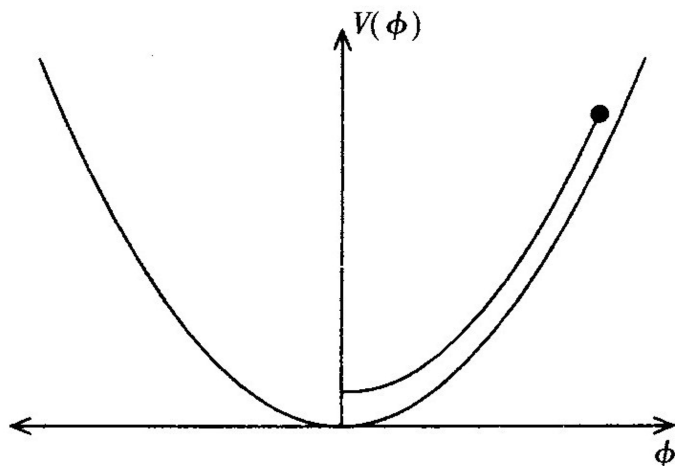


图5.9　有质标量场的势

人们从能量动量张量可以看到，如果V（ ）φ的梯度很小，则V（ ）φ就像一个有效宇宙常数那样起作用。

标量场的能量动量张量

$$T_{ab}=\phi,_{a}\phi,_{b}-\frac{1}{2}g_{ab}\phi,_{c}\phi,c-g_{ab}V\left(\phi\right)$$

现在波函数不仅依赖于导出度规h_{ij}，而且依赖于φ在Σ上的值φ_0。对于小的三维圆球面以及大的φ_0值，人们可以解场方程。具有这种边界的解近似地为四维球的一部分，以及几乎为常数的φ场。这就像德西特情形，而势V（φ_0）起着宇宙常数的作用。类似的，如果三维球的半径a比欧氏四维球的半径还大，将存在一对复共轭解。这些就像半个欧氏四维球连接到洛氏德西特解上去，而标量场V（ ）φ几乎保持常数。这样，无边界假设不仅在德西特情形而且在这个模型中，预言了一个指数膨胀宇宙的自发创生。

现在人们可以考察这个模型的演化。和德西特情形不同，它不继续无限地呈指数膨胀下去。标量场将从势V的山上滚下来到达它极小值即V（ ）φ＝0处。然而，如果V（ ）φ的初始值比普朗克值更大，则滚下的速率就比膨胀的时间尺度更慢。当标量场降低到一的数量级，它就开始在V（ ）φ＝0附近振荡。对于大多数势V，这种振荡比膨胀时间快。人们通常假定，这些标量场振荡的能量会转变成其他粒子对，并把宇宙加热上去。然而，这一些要依时间箭头的假设而定。我会很快地回到这一

点上来。

宇宙在经历了巨大倍数的指数膨胀之后就具有几乎恰好的临界膨胀率。这样，无边界假设就能解释，为何现在宇宙仍然这么接近于临界膨胀率。为了研究它对宇宙均匀性和各向同性的预言，人们必须考虑对完美的三维球度规微扰的三度规h_{ij}。人们可以把它按照球谐函数展开。它们共有三类：标量谐波、矢量谐波以及张量谐波。而矢量谐波只不过对应于连续的三维球上的坐标x_i的改变，并不起任何动力学作用。张量谐波对应于在膨胀宇宙中的引力波，而标量谐波一部分对应于坐标自由度，另一部分对应于密度微扰。

张量谐波——引力波

矢量谐波——规范

标量谐波——密度微扰

人们可以把波函数表成半径为a的完美三维球的度规的波函数乘上各谐波系数的波函数的乘积：

$$\psi[h_{ij}\ ,\ \phi_0] = \psi_0(a,\bar{\phi})\psi_a(a_n)\psi_b(b_n)\psi_c(c_n)\psi_d(d_n)$$

然后人们把波函数的惠勒—德威特方程按半径a和平均标量场φ展开到无穷多阶，但是按照微扰只展开到第一阶。人们就得到一系列相对于背景度规的时间坐标的微扰改变率的波函数要满足的薛定谔方程。

薛定谔方程

$$i\hbar\frac{\partial\psi(d_n)}{\partial t} = \frac{1}{2a^3}\left(-\frac{\partial^2}{\partial d_n^2} + n^2 d_n^2 a^4\right)\psi(d_n),$$

等等。

人们可以利用无边界条件去获得这些微扰波函数的初始条件。人们对一个小的但是稍微变形的三维球解场方程。这就得到在指数膨胀时期的微扰波函数。然后可以利用薛定谔方程去演化之。

对应于引力波的张量谐波考虑起来最为简单。它们不具有任何规范自由度而且和物质微扰不直接相互作用。人们可以利用无边界条件在被

微扰的度规中去解张量谐波的系数d_n的初始波函数。

基态

$$\psi(d_n) \propto e^{-\frac{1}{2}na^2 d_n^2} = e^{-\frac{1}{2}\omega x^2}$$

此处 $x = a^{\frac{3}{2}} d_n$ 以及 $\omega = \frac{n}{a}$

人们发现，它正是一个谐振子在引力波频率下的基态波函数。该频率随宇宙膨胀而下降。当频率比膨胀率a/a更大时，薛定谔方程允许波函数绝热地松弛而该模式将停留在它的基态。然而，频率最终会变得小于膨胀率，膨胀率在指数膨胀期间大体为常数。当频率变得比膨胀率更小时，薛定谔方程不再能足够快地改变波函数，使得它在频率改变时仍然维持在基态，相反的，它将把原先的波函数形状凝固。

在指数膨胀时期之后，膨胀率比模式的频率下降得更快。这等效于说，观察者事件视界，也就是膨胀率的倒数比模式的波长增大得更快。这样，波长将会在暴涨期间变得比视界还长，而且后来又会回到视界之内（图5.10）。到这一时刻，波函数仍然和波函数凝固时一样。然而，其频率是低得多了。因此波函数对应于高度激发态，而不是波函数凝固时的基态。引力波模式的这些量子激发产生微波背景的角度起伏，其幅度是波函数凝固时（在普朗克单位）的膨胀率。这样，宇宙背景探索者在微波背景上观测到10^{-5}的起伏，为在波函数凝固之时的能量密度设下了大约10^{-10}普朗克单位的上限。这个值低到足以保证我用过的近似十分准确。

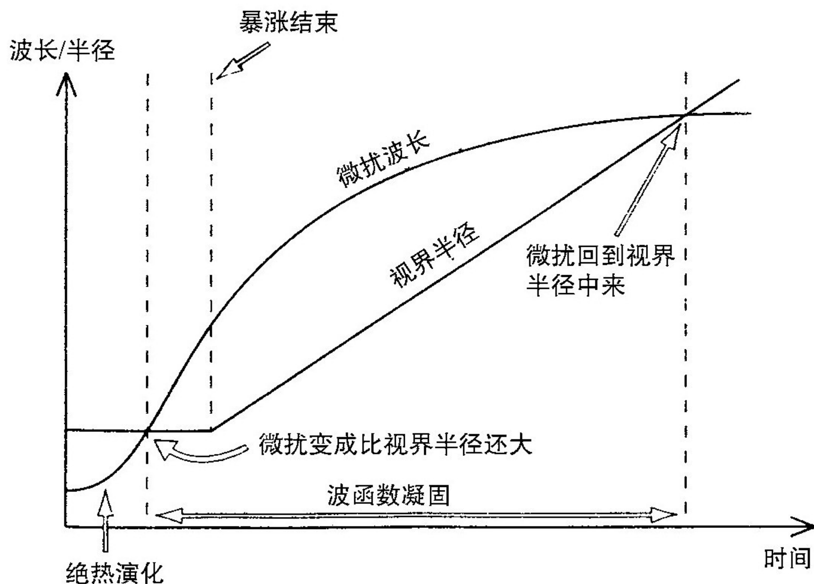


图5.10　在暴涨中波长和视界半径是时间的函数

然而，引力波张量谐波只为凝固时间的密度立下上限。其缘由是，标量谐波引起微波背景的更大起伏。在三度规h_{ij}中有两个标量谐波自由度，在标量场中有一个。然而，其中的两个对应于坐标自由度。这样，只存在一个物理的标量自由度，而它对应于密度微扰。

如果人们对直至波函数凝固之前和之后各选取一个坐标，则可以对标量谐波采取和对张量谐波非常类似的分析方法。在从一个坐标向另一坐标系统变换之中，其幅度被放大的因子是膨胀率除以V（ ）φ的平均变化率。这个因子依赖于势的斜率，但是对于合理的势至少为十。这表明密度微扰产生的微波背景起伏起码比引力波产生的大十倍。这样在波函数凝固时刻的能量密度的上限只有普朗克密度的10^{-12}。这就很安全地处于我使用过的近似的有效范围之内。这样看来，甚至对于宇宙的开初我们也不需要弦理论。

随角度大小的起伏的谱，在当前观测的精度内和几乎与张角无关的预言相符。而密度微扰的大小刚好是需要来解释星系和恒星的形成。这样看来，无边界假设能解释宇宙的所有结构，包括像我们这样的微小的非均匀性。

宇宙背景探索者预言⇒能量密度上限

加上引力波微扰 10^{-10}普朗克密度

加上密度微扰 ⇒能量密度上限

10^{-12}普朗克密度

早期宇宙内在引力温度≈10^{-6}普朗克温度＝10^{26}度

人们可以认为微波背景的微扰是由标量场V（ ）φ的热起伏引起的。暴涨时期具有膨胀率除以2π的温度，因为它在虚时间方向近似地呈周期性。这样，在某种意义上，我们不需要寻找微小的太初黑洞：我们已经观测到大约10^{26}度的，或者10^{-6}倍的普朗克温度的内禀引力温度。

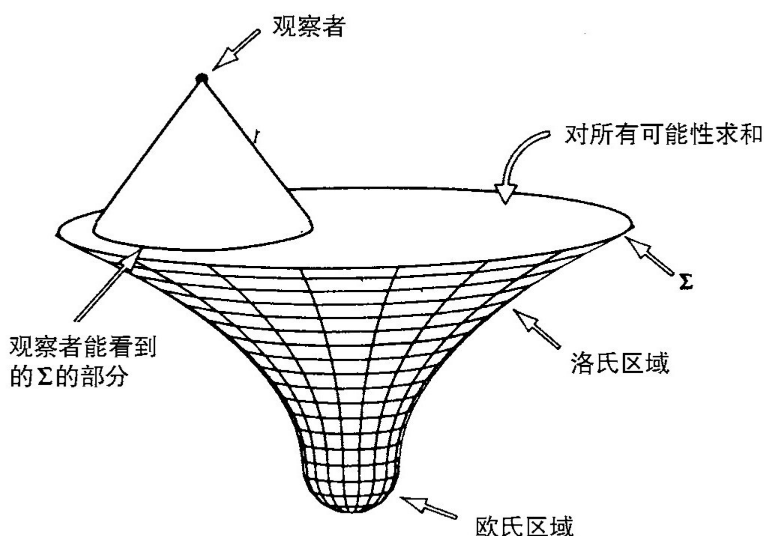


图5.11 一位观察者只能看到任何表面Σ的部分

关于和宇宙事件视界相关的内禀熵能说些什么呢？我们能观察到这个吗？我想我们能，而且我认为它对应于这个事实，即像星系和恒星这样的物体是经典物体，尽管它们是由量子起伏形成的。如果人们在一个类空表面Σ看宇宙，这个表面在某一时刻横贯整个宇宙，则宇宙处于由波函数Ψ描写的单独的量子态中。然而，我们永远看不到比Σ的一半更多，而且我们对于在我们过去光锥之外的宇宙是什么模样完全无知。这意味着在计算观察的概率之时，我们必须把Σ上我们不能观测到的部分的所有可能性求和（图5.11）。求和的效应是把我们观测的宇宙的部分从一个单独量子态改变成所谓的混合态，即不同可能性的统计系统。如果一个系统具有经典的而非量子的方式行为，这种所谓的离析是必须

的。人们通常把离析归因于与诸如热库的不被测量的外界系统相互作用。在宇宙的情形中不存在外界系统，但是我提议，我们观察到经典行为的原因是因为我们只能看到宇宙的部分。人们也许会认为，在以后的时刻他能看到全部宇宙而且事件视界会消失。但是事情并非如此。无边界假设表明宇宙是在空间上闭合的。一个闭合宇宙将会在观察者看到整个宇宙之前重新坍缩。我曾经尝试证明，这样一个宇宙的熵在它最大膨胀时刻应为其事件视界面积的1/4（图5.12）。然而，我在此刻似乎得到3/16的因子，而不是1/4。很明显，我要么弄错了，要么丢掉什么了。

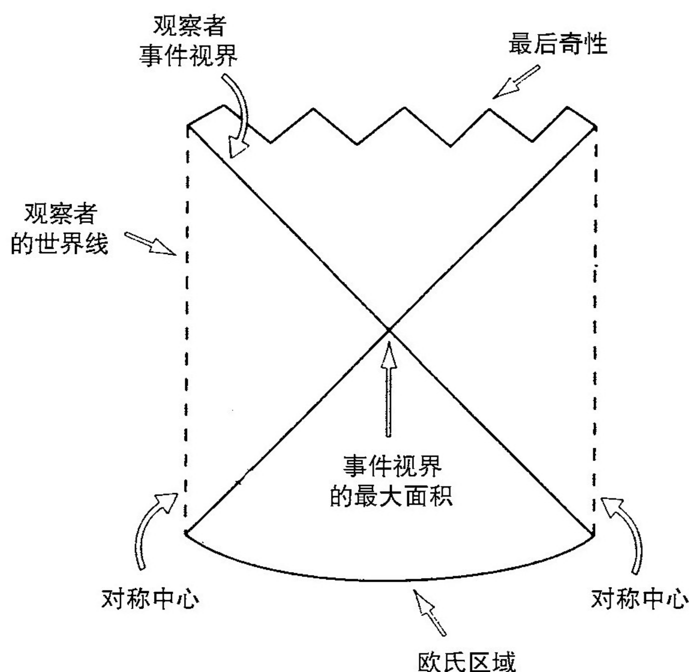


图5.12　在观察者能看到整个宇宙之前，它就坍缩到最后的奇性

我要在罗杰和我意见非常分歧的一个论题上结束这次讲演——时间箭头。宇宙里我们区域中在向前和向后方向存在非常清楚的区别。人们只要把影片往回倒即能看到这个差别。杯子不是从桌沿落下并粉碎，而是碎片自己拼补好并跳回到桌子上。如果真实生活都像这样就好了。

物理场服从的局部定律是时间对称的，或者更精确点说，是CPT不变的。这样，在过去和将来之间观察到的差别应该来自于宇宙的边界条件。让我们接受宇宙是在空间上闭合的，而且它膨胀到最大尺度然后再

坍缩。正如罗杰强调的，在这个历史的两端宇宙是非常不同的。在我们叫作宇宙开端的，似乎曾经非常光滑而且规则。然而，我们预料当它重新坍缩时，会变成非常无序和无规，因为存在比有序的配置多得太多的无序的配置，这表明初始条件曾经被不可思议地精密地选定过的。

因此，似乎在时间的两端必须有不同的边界条件。罗杰的设想是，在时间的一端而不是另一端外尔张量必须为零。外尔张量是时空曲率中不由物质通过爱因斯坦方程定域决定的那部分。它在光滑的有序的早期阶段曾经很小，但是在坍缩的宇宙中很大。这样这个假设把时间的两端区分开来并因此可以解释时间的箭头（图5.13）。

我以为罗杰的假设中的外尔张量是在不止一层含义上来说的。首先，它不是CPT不变的。罗杰把这当作优点，而我却觉得除非有不得已的理由去抛弃对称，我们应当坚持之。正如我要论证的，不必要放弃CPT。其次，如果在早期宇宙外尔张量一度准确地为零，那时宇宙就应是完全均匀且各向同性的而且会在所有的时刻保持如此。罗杰的外尔假设既不能解释背景中的起伏，也不能解释产生星系以及像我们身体这样的微扰。

对外尔张量假设的异议

1.不是CPT不变的。

2.外尔张量不能一度准确为零。不能解释小起伏。

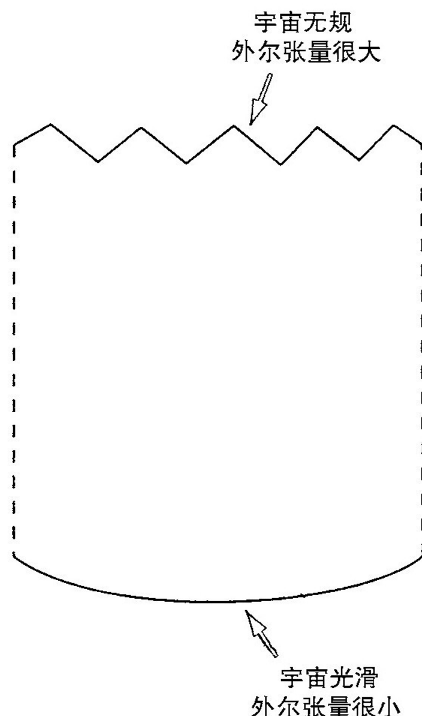


图5.13　用外尔张量假设来区别宇宙的两端

尽管这一切，我以为罗杰抓住了时间两端的一个重要差别。但是外尔张量在一端很小的事实不能被当作一个特别的边界条件而应从一个更基本的原则，即无边界假设推出。正如我们已经看到的，这意味着在围绕着半个欧氏四维球和半个洛氏德西特解相接的背景的微扰处于它们的基态。那就是说，它们是和不确定原理相一致的尽量小的状态。这个就隐含着罗杰外尔张量条件：外尔张量不是精确地为零，它是尽可能地接近于零。

我起先认为：这些有关微扰处于它们基态的论证可适用于膨胀收缩循环的两端。宇宙从光滑和有序启始，而随着膨胀变得更无序和无规。然而，我以为当它变小时又必须回到一种光滑和有序的状态。这就意味着在收缩相热力学时间箭头要反向。杯子又会自己拼凑好并跳到桌子上来。随着宇宙重新缩小，人们越活越年轻，而不是越活越老。由于等待宇宙重新坍缩需要太长时间，所以等到那时返回青春是无望的。但是如果当宇宙收缩时，时间箭头反向，那么在黑洞之内也应反向。可是，我不想提倡将跳进一个黑洞作为一个人延年益寿的好办法。

我写了一篇文章宣称，当宇宙重新收缩时，时间箭头会反向。但是之后和当·佩奇以及雷蒙·拉弗勒蒙的一番讨论使我信服，我犯了最大的错误，或者是我在物理学上的最大错误：宇宙不在坍缩中回到光滑的状态。这表明时间箭头并不反向。它会继续像在膨胀相中一样指向相同方向。

时间的两个端点何以这么不同呢？为何在一端微扰必须很小，而另一端却不？其原因是，场方程存在配合微小三维球边界的两个可能的复数解。一个正是我早先描述过的：它是近似地用半个欧氏四维球和洛氏德西特解的一个小部分相连接（图5.14）。另一种可能解是以同样的半欧氏四维球连接到一个洛氏解上，该洛氏解膨胀到非常大的半径，然后再收缩到给定边界的小半径（图5.15）。很显然，一个解对应于时间的一端，而另一个解对应于另一端。这两个端点之间的差别来自于这个事实，在第一个仅具有很短的洛氏时期的解的情形，三度规h_{ij}的微扰衰减得很厉害。然而，在膨胀又收缩的解的情形，微扰可以非常大并不被显著地衰减。这就引起了罗杰指出的时间两端之间的差别。宇宙在一端非常光滑并且外尔张量非常小。然而，它不能准确地为零，因为那样会违反不确定性原理。相反的，存在很小的起伏，这些起伏后来成长为星系以及像我们这样的身体。与此成鲜明对比的是，在时间的另一端点，宇宙会非常无规而且混沌，外尔张量极其巨大。这就解释了观察到的时间箭头以及为何杯子从桌子滑落粉碎而非拼凑好再跳上来。

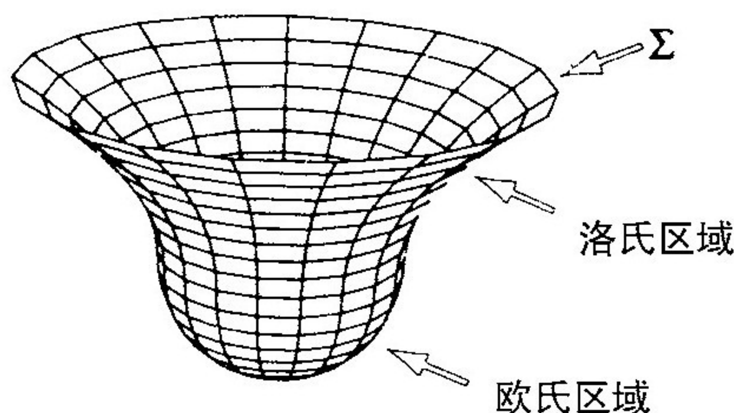


图5.14　半个欧氏四维球连接到一个小的洛氏区域

由于时间箭头不准备反向——而我已经超过时间——我最好结束讲演。我强调了我在时空研究中获悉的自认为两个最显著的特点：①引力

弯曲时空，使它有一个开端和一个终结；②因为引力本身确定它作用其上的流形的拓扑，这就导致在引力和热力学之间存在一个深刻的关联。

时空正曲率产生奇性，经典广义相对论在奇性处失效。宇宙监督可以为我们防御黑洞的奇性，但是大爆炸奇性赤裸裸地暴露在我们面前。经典广义相对论不能预言宇宙如何开端。然而，量子广义相对论和无边界假设一道，预言了我们观察到的宇宙，而且甚至似乎预言了在微波背景中观察到的起伏的谱。然而，虽然量子理论恢复了经典理论丧失了的预言性，但它并没有完全做到。因为存在黑洞和宇宙事件视界，我们不能看到整个时空，我们观察由量子态的系综而不是一个单独的态描述。这就引进了额外水平的不可预见性，但它也还可能是使宇宙看起来是经典的原因。这也许能把薛定谔猫于半死半活之间拯救出来。

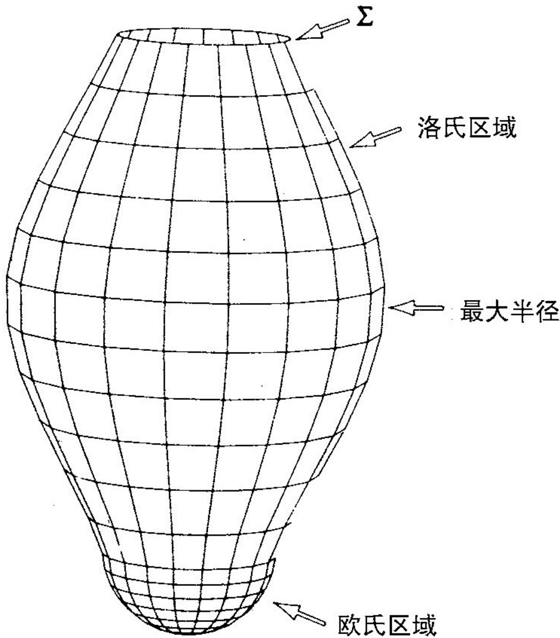


图5.15　半个欧氏四维球连接到一个小的洛氏区域，该区域膨胀到最大半径然后重新收缩

从物理学中把可预见性取消，然后在一种减少的程度上又把它恢复，这是一桩相当成功的故事。我的话完了。

第6章　时空的扭量观点

罗杰·彭罗斯

让我首先对史蒂芬上回讲演做点评论。

·猫的经典性。史蒂芬论证道，由于时空的一定区域不能触及，我们被迫使用密度矩阵的描述。然而，这不足以解释在我们区域观察的经典性质。对应于找到或者一只活猫|活〉或者一只死猫|死〉的密度矩阵和描述以下两种叠加的混合的密度矩阵相同

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|活\rangle+|死\rangle)$$

和

$$\frac{1}{\sqrt{2}}(|活\rangle-|死\rangle)。$$

这样，密度矩阵本身不能说，我们不是看到活猫便是死猫，或者是这两种叠加之一种。正如我试图在上一次讲演末尾所论证的，我们需要更多的。

·外尔曲率假设（WCH）。从我对史蒂芬立场的理解，我认为在这一点上我们的争议不太大。对于初始奇性外尔曲率近似为零，而终结奇性具有大的外尔曲率。史蒂芬争论道，在初始状态必须有小的量子起伏，并因此指出初始外尔曲率准确为零的假设不合理。我认为这不是真正的异议。在初始奇性的外尔曲率为零的说法是经典的，而在假设的精密叙述上肯定有商榷的余地。从我的观点，小起伏是可以接受的，在量子范畴肯定是这样的。人们还预料在早期宇宙的里奇张量（由于物质引起的）热起伏，而且它可能最终导致通过金斯不稳定性形成10^6太阳质量的黑洞。在这些黑洞的奇性邻近具有大的外尔曲率，但这些是终极形态而非初始形态的奇性，这些和WCH相一致。

我同意史蒂芬说的，WCH是“植物的”，也就是唯象的而不是解释的。它需要一个根本理论去解释之。哈特尔和霍金的“无边界假设”（NBP）也许是初始态结构的好的候选者。然而，我觉得我们需要某

种非常不同的东西去对付终结态。特别是，一个解释奇性结构的理论必须违反T, PT, CT以及CPT，才能产生某些具有WCH性质的东西。时间失称可能是相当微妙的；它必须隐含在超越量子力学的理论的规则之中。史蒂芬论断，按照量子场论的著名定理，人们应预料理论是CPT不变的。然而，这个定理的证明中假定QFT的通常规则行得通，而且背景空间是平坦的。我认为，史蒂芬和我都同意，第二个条件不成立，而且我还相信第一个假设失败。

我还觉得，史蒂芬提出的无边界假设的观点并不能排除白洞的存在。如果我正确地理解史蒂芬的观点，那么无边界假设意味着基本上存在两种解：解（A）中从奇性出来的微扰增大，以及解（B）中微扰衰减消失。（A）基本上对应于大爆炸，而（B）描写黑洞奇性和大挤压。确定热力学第二定律的时间箭头从解（A）过渡到解（B）。然而，我看不出这个无边界假设的解释何以排除（B）类型的白洞。我担心的另一个分开的问题是“欧几里得化过程”。史蒂芬的论证依赖如下事实，即人们可以把一个欧氏解和一个洛氏解粘在一起。然而，只有对非常少数的空间人们才可以这么做，因为它们必须不但有欧氏的而且有洛氏的截面。而一般情形肯定离此很远。

扭量和扭量空间

量子场论中使用欧几里得化的真正根源在何处呢？量子场论需要把场论分解成正频和负频部分。前者沿时间前进方向传播，而后者向后传播。为了得到理论的传播子，人们需要一种把正频率（也就是正能）部分挑出来的办法。扭量理论是完成这种分解的一个不同的框架——事实上，这种分解正是扭量的一个重要的原始动机（见彭罗斯，1986）。

为了仔细地解释，让我们首先考虑作为量子理论基础的复数，我们将会发现复数结构也是时空结构的基础。这些就是$z = x + iy$形式的数，这儿x, y为实数，而i满足$i^2 = -1$，把这种数的集合表为$\mathbb{C}$。人们可以在一个平面（复平面）上把这些数表达出来，或者如果加上无限远的一点，则可在一个球面（黎曼球）上表达出来。这个球面在数学的许多领域，例如分析和几何中，是非常有用的概念，在物理学中也是如此。该球面可被投影到一个平面（和在无限远的一点）上。取一个通过球面赤道的平面，并把球面上的任意点和南极相连。这根线和平面的交点E是它在平面上的对应点。注意：在这个映射下北极跑到原点，南极跑到无限

远，而实轴被映射到通过南北二极的一个垂直的圆周。我们可以旋转球面使实轴对应于赤道，我在此刻便采用这样的习惯（见图6.1）。

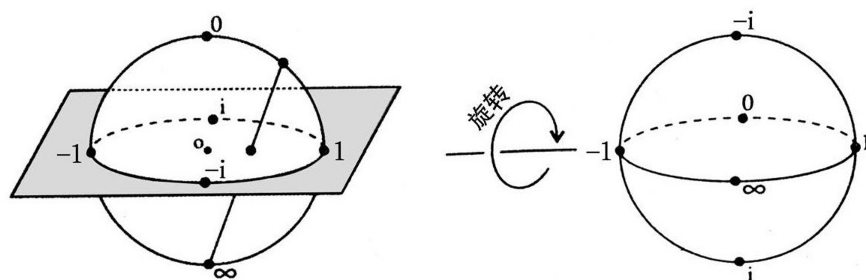


图6.1　黎曼球代表所有复数以及∞

假定我们有一个实变量x的复值函数f（x）。从上面得知，我们可以把f认为是一个在赤道上定义的函数。这种观点的一个优点是，存在一个决定f为正频还是负频的自然判据：如果f（x）可在北半球上被解析开拓，则它是一个正频函数，而它若可在南半球上被开拓，则是一个负频函数。一个一般函数可分解成正、负频部分。扭量理论的观念是以全局的方式把这个技术用到时空本身上去。在闵可夫斯基时空上给出一个场，我们要把它类似地分解成正、负频部分。我们将要建立扭量空间，作为理解这个分解的途径（见彭罗斯和林德勒，1986以及休格特和托德，1985，以对扭量有更多了解）。

让我们在讨论细节之前，考虑黎曼球在物理学中的两个重要作用。

1.具有自旋1/2的粒子的波函数可以是“上”和“下”的一个线性叠加：

$$\omega|\uparrow\rangle+z|\downarrow\rangle。$$

在黎曼球上这一状态可由点z/ω来代表，而且这一点对应于自旋的从中心出发和球面相交的正轴（首先归功于马约拉纳，还可参阅彭罗斯，1994，他们还用黎曼球上更复杂的结构来代表更高的自旋）。这就把量子力学的复数幅度和时空结构相联系（图6.2）。

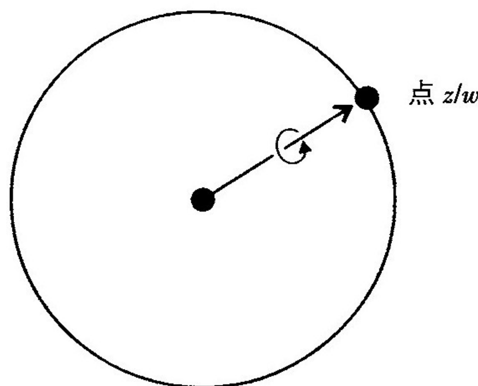


图6.2　自旋1/2粒子的自旋方向的空间是比z/ω的黎曼球，此处ω和z分别代表向上和向下的自旋的幅度

2.想象位于时空一点的观察者，向着太空观星。假定她在一个球面画出这些恒星的角位置。现在，如果第二个观察者同时穿过同一点，但和第一观察者之间有一相对速度，那么由于光行差效应，他会在球面上把这恒星在不同的位置画出。令人惊讶的是，球面上的点不同位置可由一个称为莫比乌斯变换的特殊变换相关联。这类变换精确地形成了维持黎曼球的复数结构的解。这样，通过一个时空点的光线空间，在一种自然意义上是黎曼球。此外，我发现它非常漂亮，联结具有不同速度观察者物理的基本对称群，也就是（受限制的）洛伦兹群，可以作为最简单的一维（复的）流形，黎曼球的自同构群而实现（见图6.3以及彭罗斯和林德勒，1984）。

扭量理论的基本观念是试图开发这种在量子力学和时空结构中的联系——正如在黎曼球中所显示的——把这个观念推广到整个时空。我们将要把整个光线当成甚至比时空点更基本的对象。这样，我们把时空认为是从属的概念，而把扭量空间——原先是光线空间——认为是更基本空间。这两种空间由一种对应相关联，时空中的光线在扭量空间中用点来代表。而时空中的点用通过它的光线集合来代表。这样，时空中的一点在扭量空间中变成一个黎曼球。我们应该把扭量空间当作按照它来描述物理的空间（图6.4）。

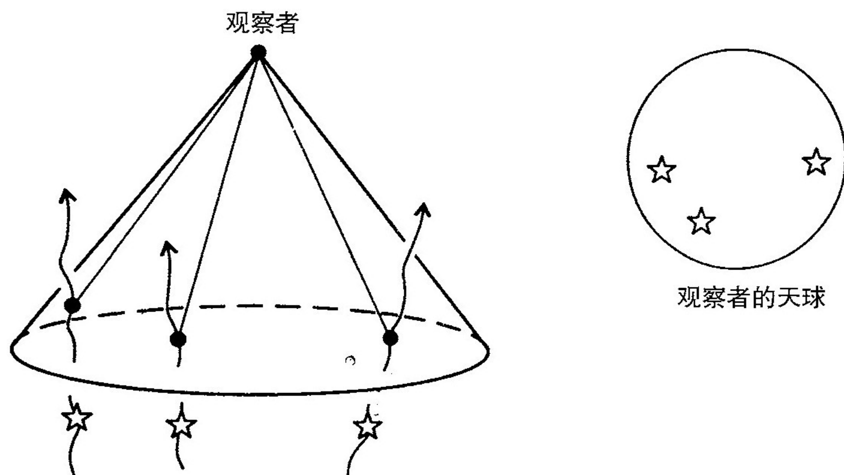


图6.3　在相对论中一个观察者的天球自然地成为一个黎曼球

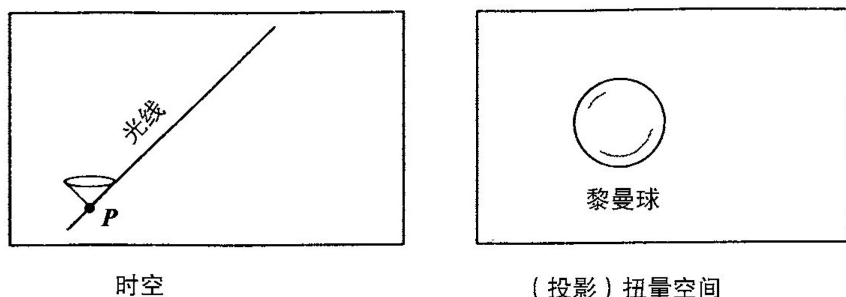


图6.4　在基本的扭量对应中，（闵可夫斯基）时空中的光线用（投影）扭量空间中的点来代表，而时空的点用黎曼球来代表

直到现在我所介绍的扭量空间有（实的）五维，由于复空间总是（实的）偶数维，所以扭量空间不能是复空间。如果我们把光线认为是光子历史，我们还需要计入光子的能量和螺旋度，螺旋度可以是左手或者右手。这比仅仅一道光线复杂了一些，但是其优点是我们最终可以用复的投影三空间（实的六维）$\mathbb{CP}_3$。这就是投影扭量空间（$\mathbb{P}T$）。它具有五维的子空间$\mathbb{P}N$，$\mathbb{P}N$把空间$\mathbb{P}T$分解成两个部分：左手部分$\mathbb{P}T^-$和右手部分$\mathbb{P}T^+$。

现在，时空中的点由四个实数给出，而投影扭量空间以四个复数的比为坐标。如果在扭量空间中由（Z^0，Z^1，Z^2，Z^3）代表的一根光线通过时空中的点（r^0，r^1，r^2，r^3），那么它们必须满足投射关系

$$\begin{pmatrix} Z^0 \\ Z^1 \end{pmatrix} = \frac{\mathrm{i}}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} r^0 + r^3 & r^1 + \mathrm{i}r^2 \\ r^1 + \mathrm{i}r^2 & r^0 - r^3 \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} Z^2 \\ Z^3 \end{pmatrix} \tag{6.1}$$

投射关系（6.1）提供了扭量对应的基础。

我需要引进某种二旋量记号。这是通常人们开始发生混淆之处，但是为了计算细节，这种记录极其便利。对任何四矢量r^a定义量$r^{AA'}$，其分量矩阵由下式给出

$$r^{AA'} = \begin{pmatrix} r^{00'} & r^{01'} \\ r^{10'} & r^{11'} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} r^0 + r^3 & r^1 + \mathrm{i}r^2 \\ r^1 - \mathrm{i}r^2 & r^0 - r^3 \end{pmatrix}。$$

r^a为实的条件即是$r^{AA'}$为厄米的。扭量空间中的一点由如下分量的两个旋量所定义

$$\omega^A \equiv \begin{pmatrix} \omega^1 \\ \omega^2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z^0 \\ Z^1 \end{pmatrix} \qquad \pi_{A'} \equiv \begin{pmatrix} \pi'_0 \\ \pi'_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z^2 \\ Z^3 \end{pmatrix}。$$

投射关系（6.1）就变成

$$\omega = \mathrm{i}r\pi。$$

应该提到的是，在原点移动之时，亦即

$$r^a \rightarrow r^a - Q^a，$$

我们有

$$\omega^A \rightarrow \omega^A - \mathrm{i}\, Q^{AA'}\pi_{A'}，$$

此处$\pi_{A'}$保持不变：

$$\pi_{A'} \rightarrow \pi_{A'}。$$

扭量代表零质量粒子动量四分量p_a（其中三个是独立的）以及角动量六分量M^{ab}（其中四个与这些是独立的）。它们可被表达成

$$p_{AA'} = \mathrm{i}\bar{\pi}_A \pi_{A'},\quad M^{AA'BB'} = \mathrm{i}\omega^{(A}\bar{\pi}^{B)}\varepsilon^{A'B'} - \mathrm{i}\varepsilon^{AB}\bar{\omega}^{(A'}\pi^{B')},$$

这儿括号表示对称部分，而ε^{AB}和$\varepsilon^{A'B'}$是斜列维—西维塔符号。这些表达式体现了如下事实，即动量p_a是零性的而且指向未来，而且泡利—鲁班斯基自旋矢量等于螺旋度s乘以四动量。这些量把扭量变量（ω^A，$\pi_{A'}$）确定至一个整体扭量相因子。螺旋度可表为

$$s = \frac{1}{2} Z^\alpha \bar{Z}_\alpha,$$

这儿扭量Z^α＝（ω^A，$\pi_{A'}$）的复共轭为对偶扭量$\bar{Z}_\alpha = (\bar{\pi}_A, \bar{\omega}_{A'})$（注意复共轭把带分号和不带分号的旋量指标相互交换，而且它把扭量和它们的对偶相交换）。这儿，$s > 0$对应于右手粒子，也就是我们当作扭量空间的上半部$\mathbb{P}T^+$，而$s < 0$对应于左手粒子，即下半部$\mathbb{P}T^-$。正是在$s = 0$情形我们得到实际的光线（因此$\mathbb{P}N$也即光线的方程为$Z^\alpha \bar{Z}_\alpha = 0$，也就是$\omega^A \bar{\pi}_A + \pi_{A'} \bar{\omega}^{A'} = 0$）。

量子的扭量

我们希望得到扭量的量子理论，为此我们必需定义扭量波函数，在扭量空间上的复值函数f（Z^α）。由于Z^α包含有涉及位置变量和所有动量变量的分量，而我们在一个波函数中同时使用所有这些，所以任意函数f（Z^α）不能先验地作为一个波函数。位置和动量不对易。在扭量空间中其对易关系是

$$\left[Z^\alpha, \bar{Z}_\beta\right] = \hbar \delta^\alpha_\beta \qquad \left[Z^\alpha, Z^\beta\right] = 0 \qquad \left[\bar{Z}_\alpha, \bar{Z}_\beta\right] = 0\ 。$$

这样Z^α和$\bar{Z}_\alpha$为共轭变量，而波函数必须是其中的一个而不是两个变量的函数。这表明波函数必须是Z^α的解析（或反解析）函数。

现在我们必须检查前述的表达式如何依赖于算符顺序。人们发现动量和角动量的表达式和次序无关，因而是正则地确定的。另一方面，螺旋度的表达式和次序有关，我们必须采用正确定义。为此我们必须取对称的积，也就是

$$s = \frac{1}{4}(Z^\alpha \bar{Z}_\alpha + \bar{Z}_\alpha Z^\alpha),$$

它在Zα空间表象中，可以重新表达成

$$s=\frac{\hbar}{2}\left(-2-Z^{\alpha}\frac{\partial}{\partial Z^{\alpha}}\right)$$

$$=\frac{\hbar}{2}(-2-Z^{\alpha}\text{的齐次度）。}$$

我们能把波函数分解成s的本征态。这刚好是确定的齐次性的波函数。例如，零自旋并具有零螺旋度粒子是齐次性为-2的扭量波函数。一个左手自旋1/2粒子具有螺旋度$s=-\frac{\hbar}{2}$，因而其扭量波函数具有齐次性-1，而这种粒子的右手版本（螺旋度$s=\frac{\hbar}{2}$）具有齐次性-3的扭量波函数。对于自旋2的右手和左手扭量波函数，其相应的齐次性为-6和＋2。

这也许显得有些向一方倾斜，因为广义相对论毕竟是左右对称的。但是自然本身是左右不对称，所以这也不见得有那么坏。此外，在广义相对论中的一个非常强有力的工具，即阿什特卡的“新变量”也是左右不对称的。有趣的是，这些不同的方式都会导致这种左右不对称性。

人们也许认为，我们只要改变$Z^{\alpha}\leftrightarrow\bar{Z}_{\alpha}$就能恢复对称性，颠倒齐次性的表，然后对一种螺旋度用Zα，另一种用$\bar{Z}_{\alpha}$。然而，正如在通常的量子力学中，我们不能同时混合位置和动量空间表象，类似的，我们不能混合Zα和$\bar{Z}_{\alpha}$表象。我们必须二者择一。究竟哪一个更基本尚未知。

下一步我们要得到f（Z）的时空描述。这可由围道积分来实现

$$\left\{\begin{matrix}\phi_{A'\cdots G'}(r)\\ \text{或}\\ \phi_{A\cdots G}(r)\end{matrix}\right\}=\int_{\omega=\mathrm{i}r\pi}\left\{\begin{matrix}\pi_{A'}\cdots\pi_{G'}\\ \text{或}\\ \frac{\partial}{\partial\omega^{A}}\cdots\frac{\partial}{\partial\omega^{G}}\end{matrix}\right\}f\left(Z^{\alpha}\right)\pi_{E'}\mathrm{d}\pi^{E'},$$

此处积分是沿着投射到r的Z空间的围道进行（记住Z有ω和π两部分），而π或者∂/∂ω的数目依场的自旋（以及手征）而定。这一方程定义了一个时空场φ...（r），它自动满足零质量粒子的场方程。这样，扭量场的解析性限制，至少对于平坦空间中的线性场，或者爱因斯坦场的弱能极限载有所有的零质量粒子的繁琐的场方程的密码。

时空中点r在几何学上是一根扭量空间中的$\mathbb{CP}^1$线（它是一个黎曼

球）。这根线必须穿过f（Z）定义的区域。一般来说f（Z）不是处处定义的，而且具有奇性的地方（我们正是围绕着这些奇性区域对围道积分求值）。在数学上更精密地讲，一个扭量波函数是一个上同调元。为了理解它，考虑我们感兴趣的扭量空间区域的开邻域的族。扭量函数应在这些开集对的交上被定义。这表明，它是第一束上同调的一个元素。我不想仔细讨论这些，但是“束上同调”听起来怪吓人的。

回想起我们真正需要的，是和量子场论相类似，找出一种从场幅度分离正频和负频的方法。如果一个定义在PN上的扭量函数（作为第一上同调元）延拓到扭量空间的上一半PT^+，它就具有正频。如果它开拓到下一半PT^-上，它便具有负频。这样，扭量空间就抓住了正频、负频的概念。

这种分解允许我们在扭量空间中开展量子物理。安德鲁·霍奇斯（1982，1985，1990）利用扭量图发展了一种量子场论的手段，该图类似于时空中的费因曼图。利用这些，他得到某种非常不同寻常的使量子场论正规化的方法。这是一些在正常时空方法中人们不想采用的方案，但在扭量表象中则非常自然。另一进展是，原先起源于迈克·辛格的一个新观点（霍奇斯·彭罗斯和辛格，1989）也受到共形场论（CFT）的刺激。史蒂芬在他第一次讲演中对弦理论进行了一些非常贬义的评论，但是我认为CFT，作为弦理论在世界片上的场论是非常漂亮的（虽然不全部是物理的）理论。它是被定义在任意的黎曼面上（黎曼球是其中最简单的例子，但是其中包括所有一复数维的诸如圆环和“扭结麻花”的流形）。对于扭量我们需要把CFT推广到具有三复数维的流形，其边界为许多片PN（也就是时空中的光线空间）。这个领域的研究正在进行之中，但是还进展得不快。

弯曲空间的扭量

我们迄今所做的一切只和平坦时空相关，但是我们知道时空是弯曲的；我们需要一种扭量理论，它可适用于弯曲时空，并以自然的方式重新导出爱因斯坦方程。

如果时空流形是共形平坦的（或者换句话说，如果它的外尔张量为零），则用扭量来描写这个空间没有任何问题，因为扭量理论基本上是共形不变的。还存在一些适用于各种共形不平坦时空的扭量观念，譬如准定域质量的定义（彭罗斯，1982；参阅托德，1990），以及伍德豪

斯—梅森（1988；还可参见弗莱彻和伍德豪斯，1990）对稳态轴对称真空的构造（这是基于沃德1977年的在平坦时空上反自对偶杨—米尔斯场的构造；还可参阅沃德，1983）；这是应用在可积分系统的非常一般的扭量方法的一部分（参阅即将出版的梅森和伍德豪斯的书，1996）。

然而，我们希望能够对付更一般的时空。对于一个具有反自对偶外尔张量（也就是外尔张量的自对偶一半为零）的复化（或欧氏化）的时空$\mathcal{M}$，存在一个构造——所谓的非线性引力子构造——能充分地讨论这个问题（彭罗斯，1976）。让我们看这是怎么进行的。取一根线的管状领域，或者类似的某些东西（例如上一半或正频部分$\mathbb{P}T^+$）组成的扭量空间的一部分，而且把它切成两个或更多个小块，然后把它们粘在一块，只不过相对之间移动一些。一般来说，在原先空间P中的直线在新空间$\mathcal{P}$中断开。然而我们能寻找新的解析曲线去取代原先（现在断的）直线，假定这些曲线光滑地接在一起。假定从P到$\mathcal{P}$的变形不是太大，用这种办法得到的解析曲线和原先的线——属于同样的拓扑的族——形成一个四维的族。代表这些解析曲线的点的空间是我们反自对偶（复的）“时空”$\mathcal{M}$（图6.5）。现在我们能把爱因斯坦真空方程（里奇平坦性）编码成$\mathcal{P}$必须是在投影线$\mathbb{C}\mathbb{P}_1$上的一个解析纤维化的条件（以及其他一些缓和条件）。只要把$\mathcal{P}$和P变形表达成自由解析函数就可以达到这一切，而在原则上弯曲时空$\mathcal{M}$的所有信息都被编码在这些函数之中（虽然在$\mathcal{P}$上找到所需要的解析曲线可能是很困难的）。

我们真正要解完整的爱因斯坦方程（而上面的构造只解决了减缩的问题，由于外尔张量的一半为零），但是这问题显然是困难的，在过去的20年间许多尝试都失败了。然而，我在前几年尝试一种新的方法（参阅彭罗斯，1992）。虽然我还没有解决这个问题，但是看起来是迄今最有希望的方法。人们发现在扭量和爱因斯坦方程之中确有深刻的关系。从下面的两个观察中可以看到这一点：

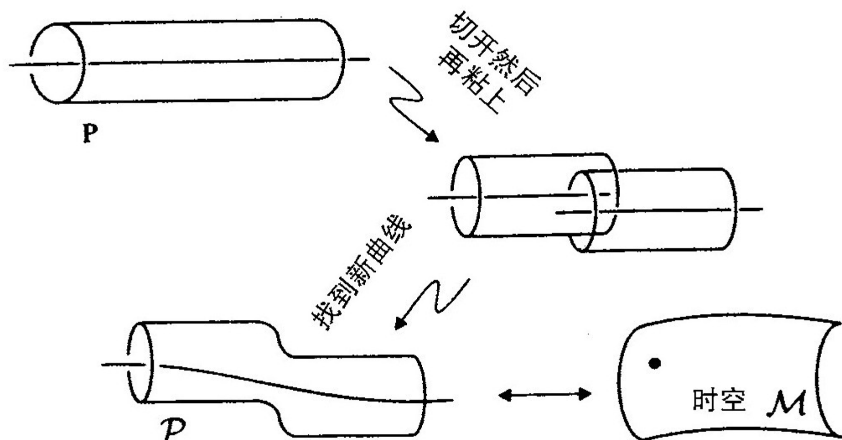


图6.5　非线性引力子构造

1.爱因斯坦真空方程$R_{ab}=0$也是具有螺旋度s＝3/2的零质量场的和谐条件（当该场按照势给出时）。

2.在平坦时空中s＝3/2场的荷的空间刚好是扭量空间。大体上可以如下实现这个规划：给定一个里奇平坦时空（也就是$R_{ab}=0$），人们必须去找在它上面的s＝3/2的场的荷空间（这不是轻而易举的事情）。这就是该里奇平坦时空的扭量空间。第二步是利用自由解析函数去建造这样的扭量空间，最后，在每种情形下从这个扭量空间重建原先的时空流形。

我们预料到这个扭量空间不是线性的，因为当我们重建时空时，它必须给出弯曲的结构。此外，由于无论是s＝3/2场的荷还是它的势都是非定域的，所以这种构造必然是以一种微妙的方式高度地非定域的。可以预料到这有助于解释诸如在我上一次讲演（第4章）中讨论的爱因斯坦—帕多尔斯基—罗逊实验的非定域物理。这些实验表明，在时空中距离遥远的物体可以某种方式相互“纠缠”在一起。

扭量宇宙学

我想对宇宙学和扭量做一些评论以结束这次讲演，虽然它是相当尝试性的。我说过，在过去奇性处外尔曲率张量必须为零，而且时空在那儿必须几乎是共形平坦的。这表明，初始态的扭量描述非常简单。随着时间的推进，这个描述将越来越复杂，而外尔曲率变得越发浓密。这种类型的行为和在宇宙几何中观察到的时间非对称相一致。

从扭量理论的复解析观念出发，更倾向于一个$k < 0$的导致开放宇宙的大爆炸（史蒂芬更倾向于一个闭合的宇宙）。其原因是只有在一个$k < 0$的宇宙中，初始奇性的对称群是一个解析群，也就是刚好是黎曼球$\mathbb{CP}^1$的解析自变换的莫比乌斯群（也就是限制的洛伦兹群）。这正是开创扭量理论的同样的群。因此，为了扭量观念的原因，我肯定倾心于$k < 0$。由于这只不过是基于观念之上，倘若将来发现宇宙事实上是闭合的，我当然可能收回这种看法！

问答

问：螺旋度3/2态有什么物理意义？

答：这个方法的自旋3/2没有实际的物理场，不如说是为了定义扭量引进的辅助场。我认为它不是人们能够发现的粒子场。另一方面，从超对称的观点看，它是引力子的超伴侣。

问：在扭量观点中，你上次讲的时间非对称的R过程在何处出现？

答：你必须意识到，扭量理论是一种非常保守的理论，它还没有触及这个问题。我非常希望看到在扭量理论中出现时间非对称，但是在此刻我不知道从何而来。然而，如果人们完全实现这个规划，它肯定会出现，也许以一种和右/左反对称那样类似的模糊方式出现。还有，安德鲁·霍奇斯的正规化方案的方法在技术上引进了时间非对称，但是关于这一点尘埃尚未落定。

问：哪种非线性的量子场论和扭量理论最贴切？

答：迄今（在扭量规划的框架中）主要分析了标准模型。

问：弦理论显明地预言了粒子的谱。这出现在扭量理论的何处？

答：我不知道粒子谱最终如何出现，虽然关于这一点已有一些线索。无论如何，我很高兴获知弦理论“显明地预言了粒子谱”。我的观点是直到我们在扭量框架中理解了广义相对论后，我们才能解决这个问题，因为质量和广义相对论关系紧密。但是，在某种意义上，这也是弦理论的观点。

问：什么是扭量理论关于连续/非连续的观点？

答：扭量理论的另一早期动机是自旋网络的理论，在这种理论中人们努力从分立的组合的量子规则建立起空间。人们也可以从分立的东西建立起扭量理论。然而，这么多年来，潮流已经从组合方法移到解析方法，但是这并不表明分立观点是劣等的。也许在分立概念和解析观念中存在深刻的联系，但是这一点还没有以任何清晰的方式显露出来。

第7章　辩论

史蒂芬·霍金和罗杰·彭罗斯

史蒂芬·霍金

这些讲演非常清晰地显示了罗杰和我之间的差别。他是柏拉图主义者，而我是实证主义者。他担心薛定谔猫处于半活半死的量子态中。他觉得这和实际不相符。但是我对此无动于衷。因为我不知道实际是什么，所以我不要求理论与之相符。实际不是某种你能用石蕊试纸检验的品质。我所关心的一切是理论应能预言测量结果。在这一点上量子理论是非常成功的。它预言出，观察的结果是猫非死即活。这就像你不能怀孕一点儿：非此即彼。

就像罗杰这样的人士，且不提那些动物解放阵线，反对薛定谔猫的原因是，由$\frac{1}{\sqrt{2}}$（猫活＋猫死）所代表的态似乎是荒谬的。为何不是$\frac{1}{\sqrt{2}}$（猫活-猫死）呢？另一种说法是在猫死和猫活之间似乎不存在任何干涉。因为人们可以把粒子和他不测量的环境绝缘得很好，所以在通过不同缝隙的粒子间能得到干涉。但是人们无法把像猫这么大的的东西和通常电磁场携带的分子之间的力隔离开。人们不必求助量子引力去解释薛定谔猫或者神经的运作。它是误入歧途的。

我并没有认真建议说，宇宙事件视界是薛定谔猫作为经典动物非死即活而不是两者组合的原因。正如我说过的，要把猫和屋子里其余东西隔离开来是非常困难的，所以人们不必去忧虑遥远的宇宙。我所说的全部是，即便我们可以巨大的精度观察到微波背景的起伏，它们仍会显得具有经典统计分布。我们检测不到任何量子态性质，诸如不同模式起伏之间的干涉或者相关性。当我们谈论整个宇宙时，我们没有像在薛定谔猫情形下的外界环境，但是因为我们不能看到整个宇宙，所以我们仍然得到离析和经典行为。

罗杰对我使用欧氏方法表示疑问。他尤其反对我把欧氏几何连接到洛氏几何上的画图。正如他正确指出的，只对于非常特殊的情形这才有

可能：一个一般的洛氏时空在其复化的流形中没有其度规为实的正定的或者欧氏的截面。然而，甚至对于非引力场的情形这也是对欧氏路径积分方法的误解。让我们以杨—米尔斯情况作例子，这是已被理解清楚的情形了。人们在这儿从闵可夫斯基空间中的所有杨—米尔斯联络求和的路径积分$e^{i\cdot 作用量}$开始。这个积分振荡而且不收敛。为了得到良好行为的路径积分，人们引进虚时间坐标τ＝—it进行维克旋转而过渡到欧氏空间。积分元就变成$e^{-欧氏作用量}$，然后人们做对在欧氏空间中的所有实联络求和的路径积分。一般来说，在欧氏空间为实的联络在闵可夫斯基空间中不再是实的，但是那不要紧。其思想是对在欧氏空间中的所有实联络求和的路径积分和对在闵可夫斯基空间中所有实联络求和的路径积分等价。正如在量子引力的情形，人们可以利用鞍点法对杨—米尔斯路径积分求值。这里的鞍点解是杨—米尔斯瞬息子，对此罗杰和扭量规划费了大量功夫进行分类。杨—米尔斯瞬息子在欧氏空间是实的。但是它们在闵可夫斯基空间是复的。这不要紧，它们仍然给出了诸如弱电重子产生这样物理过程的速率。

量子引力的情形是类似的。人们在这里可以让路径积分对所有正定的或欧氏度规而不是洛氏度规求和。如果人们允许引力场具有不同拓扑，这样做的确是必需的。人们只有在具有零欧拉数的流形上才能赋予洛氏度规。但是，正如我们看到的，像内禀熵这样有趣的量子引办效应正是出现于具有非零欧拉数而不允许洛氏度规的时空流形上。还存在引力的欧氏作用量没有下界的问题，似乎路径积分不收敛。然而，人们可以在复围道上，对共形因子积分以挽救之。这是无聊的，但是我认为这种行为和规范自由有关，而且当我们知道合适地进行路径积分时会被抵消掉。产生这个问题的物理原因是：因为引力是吸引的，所以引力势能是负的。这样，它会以某种形式在任何量子引力论中出现。如果弦理论能走到那么远，它也会在那里出现。弦理论迄今的表现相当悲惨：它甚至不能描述太阳结构，更不用说黑洞了。

在攻击了一通弦理论后，让我回到欧氏方法和无边界条件上。虽然路径积分是对正定实度规求和，其鞍点却可能是复度规。在宇宙论中当三维面Σ大于某一非常小尺度时这就会发生。虽然我把度规描写成半个欧氏四维球连接到洛氏度规上，这只不过是一个近似。实际的鞍点度规是复的。这可能使像罗杰这样的柏拉图主义者不悦，但是像我这样的实证主义者是可以接受的。人们观察不到鞍点度规。人们能观察到的一切是从它计算出的波函数，而这对应于实的洛氏度规。我对罗杰反对我使

用欧氏和复时空有点惊讶。他在他的扭量规划中使用复时空。其实，正是罗杰有关正频率是解析的评论引导我发展欧氏量子引力规划。我愿宣布，这个规划已经做出了两个可被观测检验的预言。弦理论或者扭量规划做出了多少预言？

罗杰觉得通过R过程进行观测或测量，波函数的坍缩把CPT的违反引进物理学。他认为至少在两种情形下这种违反起作用：宇宙学和黑洞。我同意，我们可以采取与有关观察同样的方式引进时间非对称。但是我完全拒绝这样的思想，存在某些对应于波函数坍缩的物理过程，或者这和量子引力或者意识有何相关。对我来说，这好像是魔术，而非科学。

我已经在我的讲演中解释了，为何我认为无边界假设能在没有任何违反CPT的情形解释了宇宙中观察到的时间箭头。我现在要解释为什么，和罗杰不同，我认为黑洞不牵涉到任何时间非对称。在经典广义相对论中，黑洞被定义成物体能落进去而没有东西可以跑出来的区域。人们会问，还存在白洞，也就是物体能跑出来而没有东西可以落进去的区域吗？我的回答是，虽然在经典理论中黑洞和白洞非常不同，在量子理论中它们却是相同的。量子理论把黑洞和白洞之间的差别排除了：黑洞能辐射，而白洞能吸收。我愿意提议：我们称作黑洞的，是大的经典的而且是非大量辐射的区域。另一方面，一个小的正发出大量量子辐射的洞正是我们所预料的白洞的行为。

我将用罗杰提到过的理想实验来解释黑洞和白洞是相同的。人们在具有完全反射壁的非常大的盒子中放置一定的能量。该能量以各种方式分布在盒子内可能状态之中。两种可能的情形对应于态的绝大多数。它们是盒子充满了热辐射或者一个黑洞和这些热辐射相平衡。哪种情形具有更多的微观态依盒子尺度以及能量多少而定。但是人们可以选择这些参数使得两种情形对应于大略相同数目的微观态。人们可以预料，该盒子在这两种情形之间徘徊不已。该盒子有时只包含热辐射，而在另一时刻辐射的热起伏使大量粒子处于一个小区域内，而形成黑洞（图7.1）。再过一段时间，因为起伏从黑洞发出的辐射可能上涨或者吸收可能下降，该黑洞就会蒸发以至消失。这样，盒子中的系统各态历经地在相空间中徘徊：有时黑洞出现，而有时黑洞又消失了（图7.2）。

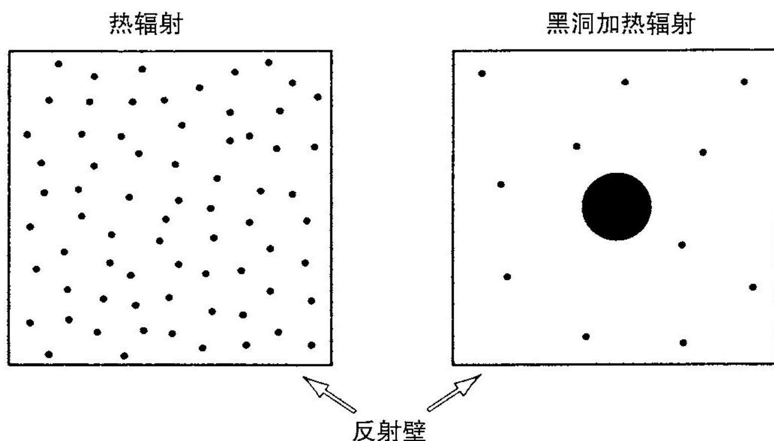


图7.1　包含固定能量的盒子或者只包含热辐射，或者包含一个和热辐射处于平衡的黑洞

罗杰和我一致同意，盒子以正如我所描述的方式行为。但是我们在两点上不一致。首先，罗杰相信，在这个黑洞的出现和消失的循环中相空间体积和信息会丧失；其次，该过程不是时间对称的。关于第一点，罗杰似乎觉得，黑洞无毛定理隐含着相空间体积的丧失，因为坍缩粒子的许多不同的配置产生同样的黑洞。他建议，R过程，也就是波函数坍缩引起相空间体积的补偿增益。我不清楚这个R过程从何而来。在盒子中没有观察者，而且我对说它是自发的不表同情，除非有人提出计算它的方法。否则的话，它只不过是魔术。我无论如何不能同意相空间体积的丧失。如果你说黑洞具有等于$e^{1/4A}$的数目的态，那就没有相空间体积丧失。而且在一个像盒子这样的系统中没有它能在任何态的信息。这样就没有信息丧失。

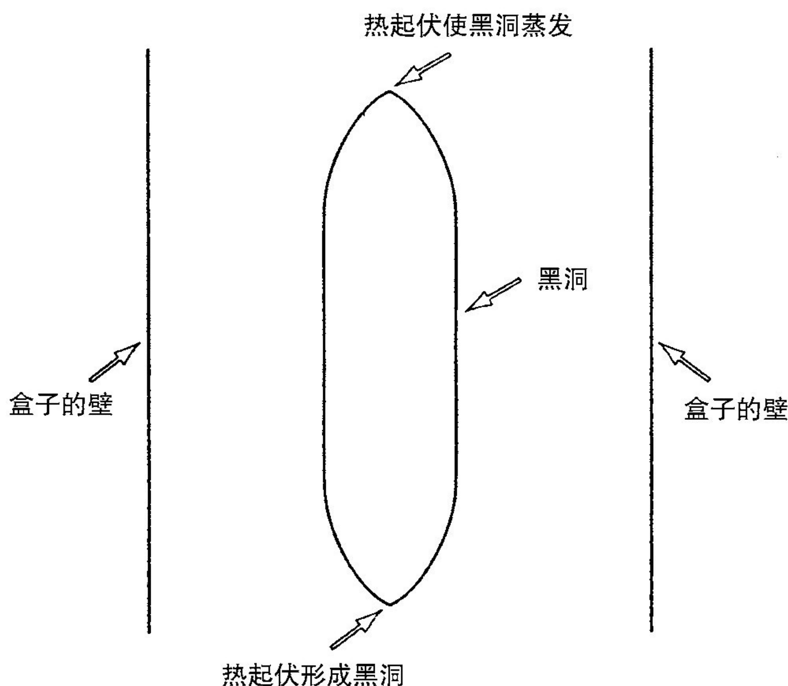


图7.2　黑洞因热起伏出现并消失

关于我们第二个争议，我相信黑洞的出现和消失是时间对称的。那就是，如果你对盒子录影，再倒过来放，会显得是相同的。在时间的一个方向，你看到黑洞出现并消失。在另一个方向，你看到白洞——黑洞的时间反演——出现并消失。如果白洞和黑洞相同的话，这两个图像可以相同。这样，没有必要因为盒子的行为而去求助CPT的违反（图7.3）。

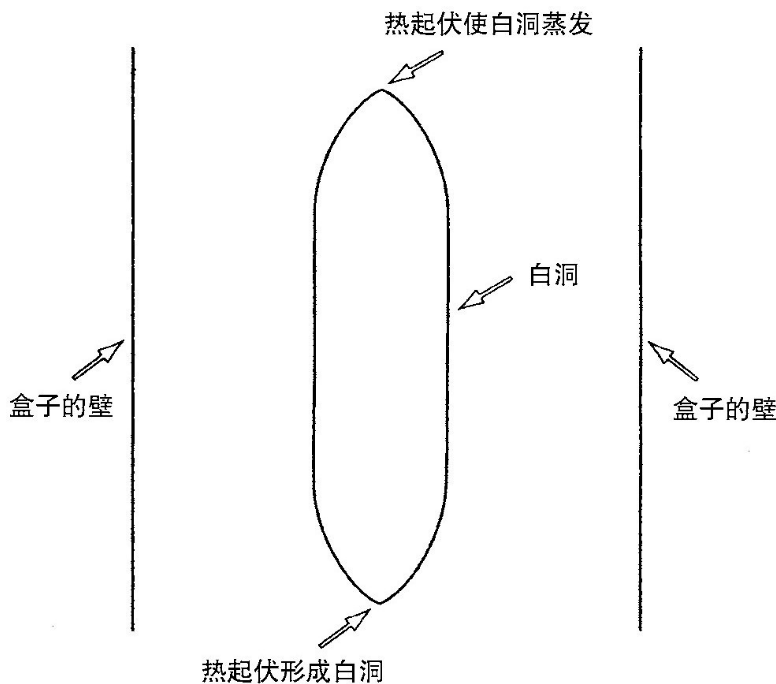


图7.3　白洞因热起伏出现并消失

起初无论是罗杰还是当·佩奇都拒绝我的建议，即盒子里的黑洞的形成和蒸发是时间对称的。然而，当现在已回心转意了。我正在期待罗杰也这么做。

罗杰·彭罗斯回答

让我首先说明，在我们之间意见一致之处比意见差异之处更多。然而，在一些（基本的）观点上我们不能达到共识，所以我在下面集中讨论这些。

猫等

无论“实在”会是什么，人们都必须解释他如何感知世界的。量子力学没有做到这一点，所以人们必须把某种东西附加到量子力学上去——某种不包含在量子力学标准规则的东西。尤其是，我觉得史蒂芬并没有明白我有关猫的问题的评论。问题不在于信息丧失意味着系统必须由密度矩阵来描述，而是比如两个密度矩阵

$$D=\frac{1}{4}\ (|活\rangle+|死\rangle)(\langle活|+\langle死|)$$

$$+\frac{1}{4}\ (|活\rangle-|死\rangle)(\langle活|-\langle死|) \qquad (7.1)$$

和

$$D=\frac{1}{2}\,|活\rangle\langle活|+\frac{1}{2}\,|死\rangle\langle死| \qquad (7.2)$$

是相等的。因此，我们必须解决为何我们感觉到猫非活即死，而从未感觉到一种叠加。我觉得在这些问题上，哲学是重要的，但它没有回答这个问题。

我觉得为了解释我们在量子力学框架中如何感知世界，我们将需要以下理论中的一种（甚至两种）：

（A）经验的理论。

（B）真正物理行为的理论。

事实上，让观察者参与进来，[在上面（7.1）情形下]相应的态矢量各自具有以下形式

1/2（|活〉±|死〉）（|观察者见到活猫〉±|观察者见到死猫〉）

（7.3）

那么第一种选择（A）就必须排斥第二个因式中的叠加的可能性，因为这种认知态是不允许的。另一方面，要求（B）排斥第一个因式中的叠加。在我自己的图像中，这些大尺度叠加是不稳定的，它们必须迅速地（自发地）衰变成|活〉和|死〉两种态中的一个。我相信史蒂芬一定是一位A—支持者〔霍金：否〕，因为他不是一位B—支持者。由于我相信采纳（A）是很危险的，这会导致无穷无尽的麻烦，所以我是坚定的B—支持者。尤其是，一位A—支持者需要精神或神经或某种类似东西的理论。史蒂芬似乎既非A—支持者，也非B—支持者，我对此很惊讶；我在等待他对此进行评论。

维克旋转

这在量子场论中是有用的工具。人们把t用it来替换意味着时间轴的

旋转。这就把闵可夫斯基空间翻译成欧氏空间。它的用处起源于如下事实，在欧氏理论中某些表达式（譬如路径积分）可被更好地定义。在量子场论中维克旋转是一个很好驾御的工作，至少在人们把它应用于平坦（或稳态）时空时是如此。

史蒂芬把“维克旋转”运用到洛氏度规（以得到欧氏度规的空间）的思想肯定是非常有趣和天才的，但是这个步骤和把维克旋转在量子场论中的运用非常不同。它真正是在不同水平上的一种“维克旋转”。

无边界假设是一个非常美好的假设，并且看来肯定和外尔曲率假设相关。然而，以我的观点，无边界假设离解释过去奇性具有小的外尔曲率，而未来奇性具有大的外尔曲率还很遥远。这是我们在我们的宇宙中观察到的，而且我相信史蒂芬在观察方面和我取相同意见。

相空间丧失

我认为，史蒂芬和我都同意在黑洞中有信息丧失，但是关于黑洞相空间丧失的问题有分歧。史蒂芬宣布R过程仅仅是魔术而非物理。显然对这一点我不能苟同；我认为在我的第二次讲演中已经解释了，为什么这是合理的，而且给出了态减缩应发生的速率的确定设想，也就是时间

$$T \sim \frac{\hbar}{E} \qquad (7.4)$$

我还认为他的黑洞图是非常误导的。他应该画卡特图，然后可以明显看出不是时间对称的。看来他和我都同意信息丧失，但是我还相信相空间体积减小。此外，如果整个框架是时间对称的，我们应允许有白洞，这是许多东西能跑出来的区域，而这至少和外尔曲率假设不一致，和热力学第二定律不一致，而且可能和观察也不一致。这个问题和“量子引力”允许何种奇性的问题紧密相关。我认为，理论必须隐含有时间非对称。

史蒂芬·霍金

罗杰为薛定谔可怜的猫担忧。在今天这样的理想实验不是政治上正确的。罗杰之所以关心是因为具有猫活和猫死等概率的密度矩阵也具有猫活＋猫死和猫活-猫死的等概率。为何我们观察到猫非死即活，而不是观察到猫活＋猫死或猫活-猫死呢？究竟是什么东西为我们观察挑出了活

和死的轴，而不是活＋死和活-死呢？我首先要指出的是，只有当密度矩阵的本征值恰巧相等时，人们才遇到其本征态的含糊。如果活或死的概率稍有差别，本征态就不会有任何含糊之处。作为密度矩阵的本征态的一组基可以和其他的基区分开来。那么为何自然选取密度矩阵按照活/死基对角化，而不按照（活＋死）/（活-死）基对角化呢？其答案是，态猫活和态猫死在客观水平上的不同起因于像子弹的位置以及猫身上的伤口这类的东西。当你一直追踪到你看不到的事物，譬如说空气分子的扰动，在态猫活和态猫死之间的任何观察量矩阵元都将平均为零。这就是为何人们观察到猫非死即活，而不是二者的线性组合。这只不过是通常的量子力学。人们不需要新的测量理论，更不需要量子引力。

让我们回到量子引力上来。罗杰似乎接受无边界假设能解释早期宇宙的小外尔张量。然而，他对它能否解释预料在黑洞引力坍缩以及整个宇宙坍缩中出现的大外尔张量表示疑问。我以为这又是因为对无边界假设的误解引起的。罗杰会同意，存在从几乎光滑的早期宇宙开始的，并在引力坍缩中发展成高度无规的洛氏解。人们可能把这些洛氏度规和在早期宇宙中的半个欧氏四维球连接起来。这就给出了在坍缩中高度变形三维几何的波函数的近似鞍点（图7.4）。当然，正如我早先说过的，其准确的鞍点度规是复的，既不是欧氏的，也不是洛氏的。尽管如此，正如我描述过的，在很好的近似下，人们可把它分成几乎欧氏和几乎洛氏的区域。其欧氏区域只和半个完美的四维球稍有差别。这样，其欧氏作用量只比半个完美四维球的稍大一些，后者对应于均匀的各向同性的宇宙。其洛氏部分和均匀的各向同性的解差异非常大。然而，这个洛氏部分的作用量只改变波函数的相，而不影响其幅度。这由欧氏部分的作用量给出，而且几乎和三维几何如何变形无关。这样，所有三维几何在引力坍缩中都同等可能，而人们会典型地得到具有大的外尔曲率的非常无规的度规。我希望这会使罗杰以及任何其他人对此事信服，即无边界假设既能解释早期宇宙是光滑的，又能解释引力坍缩是无规的。

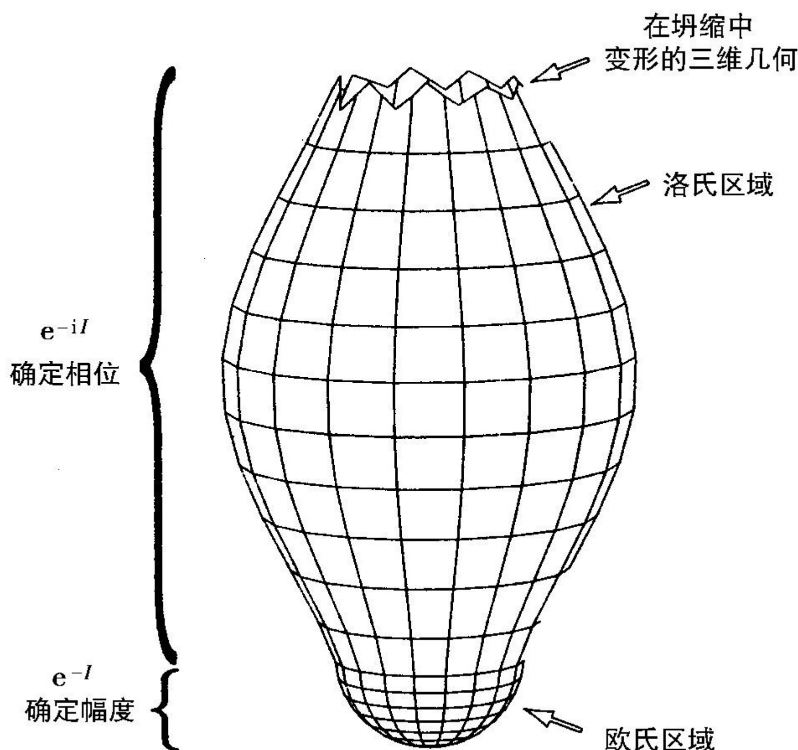


图7.4　在向坍缩三维几何隧道穿透中，欧氏截面确定三维几何波函数的幅度，而洛氏截面确定其相位

我下面谈到的是有关盒子中的黑洞的理想实验。罗杰似乎仍然要宣称，因为许多不同的配置能坍缩并形成同一个黑洞，所以存在相空间体积丧失。但是黑洞热力学的整个要点是避免这种相空间丧失。人们把一个熵赋予黑洞正是因为它们可以e^s方法形成。当它们以一种时间对称的方式蒸发时，它们以e^s方式发出辐射。这样，不存在相空间体积丧失，并不需要去求助R过程给予补偿。这么说也行：我相信引力坍缩，但是不相信波函数坍缩。

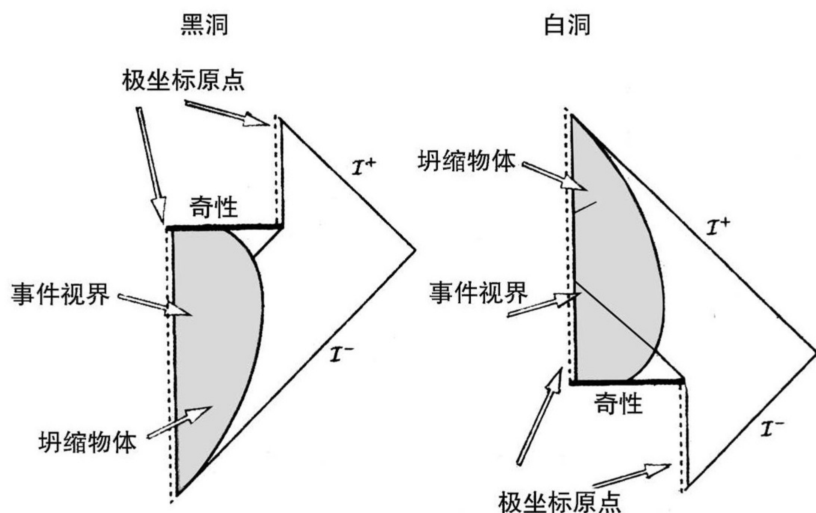


图7.5　黑洞和白洞的卡特—彭罗斯图

我最后要谈黑洞和白洞的等同。罗杰反对道，其卡特—彭罗斯图非常不同（图7.5）。我同意，它们是不同的，但是还要说，它们只不过是经典的图画。我要在量子理论中宣称，对于一位外界观察者而言，黑洞和白洞是相同的。但是，罗杰也许会反驳，对于某个落进洞里去的人，他会怎么认为呢？我认为这个论证陷入了假定时空正如在经典理论中只存在单独的度规的陷阱。另一方面，在量子理论中，人们必须对所有可能度规进行路径积分。对不同的问题将具有不同的鞍点度规。尤其是，对于外界观察者间的问题的鞍点度规，和对于一位落进的观察者的鞍点度规不同。人们还能想象黑洞能发射出观察者来。其概率是小的但仍是可能的。对于这样一位观察者的鞍点度规将对应于白洞卡特—彭罗斯图。这样，我关于黑洞和白洞等价的宣称是和谐的。这是仅有的使量子引力CPT不变的自然方法。

罗杰·彭罗斯答复

让我回到史蒂芬有关猫问题的评论。事实上本征值的相等与问题无关。最近已被证明（休斯顿，等1993），对于任何密度矩阵（甚至具有完全不同的本征值）的所有把它写成（不必是正交的）态的概率混合，存在一种测量。人们在原则上可以对“态矢量的未知部分”进行该测量，它能够把“已知部分”的密度矩阵解释成该特定的概率混合。此外，就环境的效应而言，可以指出，尽管非对角项可能很小，它们对本征态的效应也可以很大。史蒂芬还进而提到子弹等等。这并没有击中要害，因为

我们对只有“猫”的系统存在的问题仍然适用于“猫＋子弹”的系统。我认为这个有关“实在”的问题是史蒂芬和我之间的根本差别，它还和其他问题有关——例如，有关白洞和黑洞是否相等，等等。所有这一切真正地显示了，在宏观水平我们只感知一个时空的事实。这样，我觉得人们要么必须支持（A），要么必须支持（B）——我觉得史蒂芬没有涉及这一点。

对于非常小的洞而言，黑洞和白洞可以非常类似。一个小黑洞会发射出大量辐射，因而会和一个白洞相似。人们以为一个小白洞也会吸收大量辐射。但是我觉得这种等同在宏观水平上不尽合适；我相信这里还缺少一点什么。

量子力学才诞生75年。如果人们把它和牛顿的引力论相比较，这个时间是短暂的。因此如果量子力学对于非常宏观物体有一天必须加以修正，我不觉得惊讶。

在辩论的开头史蒂芬说，他认为他是一个实证主义者，而我是一个柏拉图主义者。我乐意接受他为实证主义者，但是我认为这儿的关键点是，我宁愿被称为现实主义者。还有，如果有人把这次辩论和玻尔与爱因斯坦之间的70多年前的著名论争相比较，我认为史蒂芬应该取玻尔的角色，而我取爱因斯坦的角色！因为爱因斯坦论断道，必须存在不被波函数表示的诸如真实世界的某物，而玻尔强调道，波函数不描写一个“真实”的微观世界，它只不过是对做预言有用的“知识”而已。

人们认为玻尔赢得了这次论争。事实上，根据佩斯（1994）最近的爱因斯坦传记，爱因斯坦若在1925年之后以钓鱼度过余生，这对科学并无甚损失。的确，他并没有获得许多进展，尽管其犀利的批判非常有用。我相信，爱因斯坦没有继续在量子论做出许多贡献，乃是量子力学中缺失了关键的部分。这个缺失的部分正是50年之后史蒂芬的发现，黑洞辐射。正是这种和黑洞辐射相关的信息缺失提供了新观念。

问答

盖瑞·霍罗维茨（评论）：有关弦理论有许多轻视的评价。尽管它们曾被人轻视过，至少其中的许多种似乎显示，弦理论是相当重要的。其中一些评论是误导的，有些完全错误。首先，弦理论在弱场极限下归结成广义相对论，而因此可以导出广义相对论所推出的一切。它也许能更

好地理解在奇性处发生的，而且事实上一些不能控制的发散似乎已被弦理论所解决。我当然不是宣称说，弦理论已经克服了它的所有问题，但是它仍然是一个非常有前途的途径。

问：一个令人困扰的问题，还是关于猫的。

答：罗杰·彭罗斯重新解释猫的问题。

问：罗杰·彭罗斯能对离析历史的方法加以评论吗？人们已经知道存在由外界环境引起的非常好的离析；然而，人们（还）未能理解，离析如何从内部起作用。这也许和离析也许与时空性质相关这个事实有关？

答（彭罗斯）：在离析历史规划中，和R操作等效的某种东西是该框架的一部分。它和通常的量子力学不同，但是尽管如此它也是某种和我的方法不同的东西，然而，听到说它也许和时空结构有关是令人感兴趣的。就时间非对称问题而言，我认为我的方法和和谐历史方法的差异比和史蒂芬方法的差异小。

问：盒子中的黑洞的理想实验的熵是怎么回事？时间反演的情形是否违反热力学第二定律？

答（霍金）：盒子处于最大熵状态。系统各态历经地在所有可能态之间徘徊，因此并不违反。

问：量子测量的机制能用实验检测吗？

答（彭罗斯）：（在原则上）应是可能用实验检测到它。人们也许必须尝试某种大尺度的类型试验。这类实验的麻烦在于，环境引起的离析效应通常比人们愿意测量的效应更大。这样，人们就必须把系统隔离得非常好。尽我所知，还没有人提出检验这个思想的细节，但这肯定是十分有趣的。

问：在一个宇宙的暴涨模型中，宇宙的质量必须在膨胀和收缩宇宙之间平衡得非常好。迄今平衡所需的物质只有百分之十被观测到，而寻找余下的物质使我联想起上世纪和本世纪之交对“以太”的寻找。你愿对此做评论吗？

答（彭罗斯）：我对哈勃常数取当前的值的范围颇为高兴，我可以认可百分之十的临界质量。反正我从未特别喜爱暴涨模型。但是我认为

史蒂芬要宇宙是闭合的，作为他无边界假设的一部分。（霍金：是！）

答（霍金）：哈勃常数可能比宣布的小。在过去的50年间它减少了10倍，而我看不出它为何不会再减少一半。这就减少了所要寻找的物质。

参考文献

Aharonov, Y.，Bergmann, P.，and Lebowitz, J.L.1964.Time symmetry in the quantum process of measurement.In *Quantum Theory and Measurement*，ed.J.A.Wheeler and W.H.Zurek.Princeton University Press, Princeton，1983.Originally in *Phys.Rev.*134B，1410—1416.

Bekenstein, J.1973.Black holes and entropy.*Phys.Rev.*D7，2333—2346.

Carter, B.1971.Axisymmetric black hole has only two degrees of freedom.*Phys.Rev.Lett.*26，331—333.

Diósi, L.1989.Models for universal reduction of macroscopic quantum fluctuations.*Phys.Rev.*A40，1165—1174.

Fletcher, J.，and Woodhouse, N.M.J.1990.Twistor characterization of stationary axisymmetric solutions of Einstein's equations.In *Twistors in Mathematics and Physics*，ed.T.N.Bailey and R.J.Baston.LMS Lecture Notes Series 156.Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Gell-Mann, M.，and Hartle, J.B.1990.In *Complexity, Entropy, and the Physics of Information*.SFI Studies in the Science of Complexity, vol.8，ed.W.Zurek.Addison-Wesley, Reading, Mass.

Geroch, R.1970.Domain of dependence.*J.Math.Phys.*11，427—449.

Getoch, R.，Kronheimer, E.H.，and Penrose, R.1972.Ideal points in spacetime.*Proc.Roy.Soc.London*A347，545—567.

Ghirardi, G.C.，Grassi, R.，and Rimini, A.1990.Continuous-spontaneous-reduction model involving gravity.*Phys.Rev.*A42，1057—1064.

Gibbons, G.W.1972.The time—symmetric initial value problem for black holes.*Comm.Math.Phys.*27，87—102.

Griffiths, R.1984.Consistent histories and the interpretation of quantum mechanics.*J.Stat.Phys*.36，219—272.

Hartle, J.B.，and Hawking, S.W.1983.Wave function of the universe.*Phys.Rev.*D28，2960—2975.

Hawking, S.W.1965.Occurrence of singularities in open universes.*Phys.Rev.Lett.*15，689—690.

Hawking, S.W.1972.Black holes in general relativity.*Comm.Math.Phys.*25，152—166.Hawking, S.W.1975.Particle creation by black holes.*Comm.Math.Phys.*43，199—220.

Hawking, S.W.，and Penrose, R.1970.The singularities of gravitational collapse and cosmology.Proc.Roy.Soc.Londou A314，529—548.

Hodges, A.P.1982.Twistor diagrams.*Physica*114A，157—175.

Hodges, A.P.1985.A twistor approach to the regularization of divergences.*Proc.Roy.Soc.London*A397，341—74.Also, Mass eigenstates in twistor theory, ibid.，375—396.

Hodges, A.P.1990.Twistor diagrams and Feynman diagrams.In *Twistors in Mathematics and Physics*，ed.T.N.Bailey and R.J.Baston.LMS Lecture Notes Series 156.Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Hodges, A.P.，Penrose, R.，and Singer, M.A.1989.A twistor conformal field theory for four space-time dimensions.*Phys.Lett.*B216，48—52.

Huggett, S.A.，and Tod, K.P.1985.*An Introduction to Twistor Theory*.London Math.Soc.student texts.LMS publication, Cambridge University Press, New York.

Hughston, L.P.，Jozsa, R.，and Wooters, W.K.1993.A complete

classification of quantum ensembles having a given density matrix.*Phsy.Lett.*A183，14—18.

Israel, W.1967.Event horizons in static vacuum space-times.*Phys.Rev.*164，1776—1779.

Majorana, E.1932.Atomi orientati in campo magnetico variabile.*NuovoCimento*9，43—50.

Mason, L.，J.，and Woodhouse, N.M.J.1996.*Integrable Systems and Twistor Theory*（tentative）.Oxford University Press, Oxford（forthcoming）

Newman, R.P.A.C.1993.On the structure of conformal singularities in classical general relativity.*Proc.Roy.Soc.London*A443，473—492；II，Evolution equations and a conjecture of K.P.Tod, ibid.，493—515.

Omnes, R.1992.Consistent interpretations of quantum mechanics.*Rev.Mod.Phys.*64，339—82.

Oppenheimer, J.R.，and Snyder, H.1939.On continued gravitational contraction.*Phys.Rev.*56，455—459.

Pais, A.1994.*Einstein Lived Here*.Oxford University Press, Oxford.

Penrose, R.1965.Gravtational collapse and space-time singularities.*Phys.Rev.Lett.*14，57—59.

Penrose, R.1973.Naked singularities.*Ann.N.Y.Acad.Sci.*224，125—134.

Penrose, R.1976.Non-Linear gravitons and curved twistor theory.*Gen.Rev.Grav.7*，31—52.

Penrose, R.1978.Singularities of space-time.In *Theoretical Principles in Astrophysics andRelativity*，ed.N.R.Liebowitz, W.H.Reid, and P.O.Vandervoort.University of Chicago Press, Chicago.

Penrose, R.1979.Singularties and time-asymmetry.In *General Relativity：An Einstein Centenary*，ed.S.W.Hawking and W.Israel.Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Penrose, R.1982.Quasi-local mass and angular momentum in general relativity.*Proc.Roy.Soc.London*A381，53—63.

Penrose, R.1986.On the origins of twistor theory.In *Gravitation and Geometry*（I.Robinson Festschrift volume），ed.W.Rindler and A.Trautman.Bibliopolis, Naples.

Penrose, R.1992.Twistors as spin 3/2 charges.In *Gravitation and Modern Cosmology*（P.G.Bergmann's 75th Birthday volume），ed.A.Zichichi, N.de Sabbata, and N.sánchez.Plenum Press, New York.

Penrose, R.1993.Gravity and quantum mechanics.In *General Relativity and Gravitation*1992.Proceedings of the Thirteenth International Conference on General Relativity and Gravitation held at Cordoba, Argentina，28 June-4 July 1992.Part 1，Plenary Lectures, ed.R.J.Gleiser, C.N.Kozameh, and O.M.Moreschi.Institute of Physics Publication, Bristol and Philadelphia.

Penrose, R.1994.*Shadows of the Mind：An Approach to the Missing Science of Consciousness*.Oxford University Press, Oxford.

Penrose, R.，and Rindler, W.1984.*SpinorsandSpace-Time*，vol.1：*Two-Spinor Calculus and Relativistic Fields*.Cambridge University Press.Cambridge.

Penrose, R.，and Rindler, W.1986.*Spinors and Space-Time*，vol.2：*Spinor and Twistor Methods in Space-Time Geometry*.Cambridge University Press, Cambridge.

Rindler, W.1977.*Essential Relativity*.Springer-Verlag, New York.

Robinson, D.C.1975.Uniqueness of the Kerr black hole.*Phys.Rev.Lett.*34，905—906.

Seifert, H.-J.1971.The causal boundary of space-

times.J.Gen.Rel.and Grav.1 , 247—259.

Tod, K.P.1990.Penrose's quasi—Jocal mass.In *Twistors in Mathematics and Physics* , ed.T.N.Bailey and R.J.Baston.LMS Lecture Notes Series 156.Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Ward, R.S.1977.On self-dual gauge fields.*Phys.Lett.*61A , 81—82.

Ward, R.S.1983.Stationary and axi-symmetric spacetime.*Gen.Rel.Grav.*15 , 105—109.

Woodhouse, N.M.J. , and Mason, L.J.1988.The Geroch group and non Hausdorff twistor spaces.*Nonlinearity*1 , 73—114.

第一推动丛书: 宇宙系列

The Cosmos Series

霍金讲演录

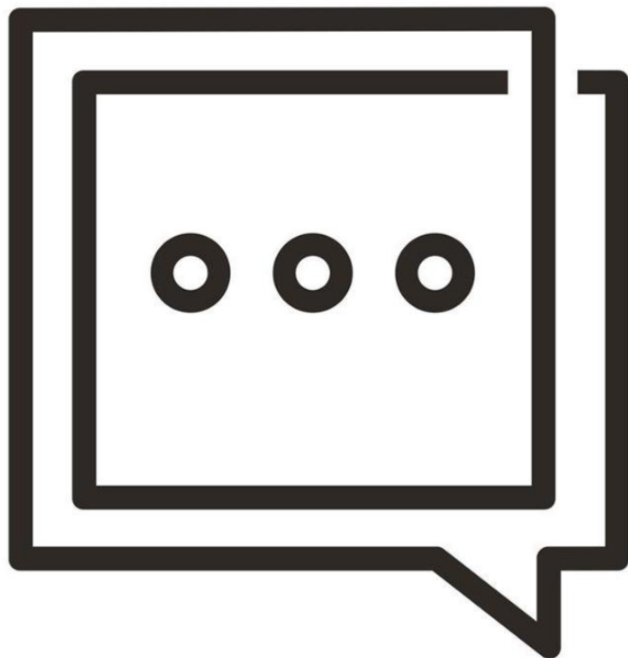
Black Holes and Baby Universe and Other Essays

[英] 史蒂芬·霍金 著

杜欣欣 吴忠超 译

Stephen Hawking

THE FIRST MOVER



湖南科学技术出版社

版权信息

霍金讲演录

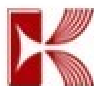
著者：[英]史蒂芬·霍金

译者：杜欣欣　吴忠超

责任编辑：李永平　吴炜　戴涛　杨波

装帧设计：邵年　李叶　李星霖　赵宛青

ISBN：9787535794543



湖南科学技术出版社

HUNAN SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS

目录

版权信息
总序
再版序 一个坠落苹果的两面：极端智慧与极致想象
出版者前言
译者序
序言
第1章 童年
第2章 牛津和剑桥
第3章 我的病历
第4章 公众的科学观
第5章 《时间简史》之简史
第6章 我的立场
第7章 理论物理已经接近尾声了吗？
第8章 爱因斯坦之梦
第9章 宇宙的起源
第10章 黑洞的量子力学
第11章 黑洞和婴儿宇宙
第12章 一切都是注定的吗？
第13章 宇宙的未来
第14章 《荒岛唱片》访谈记

总序

《第一推动丛书》编委会

科学，特别是自然科学，最重要的目标之一，就是追寻科学本身的原动力，或曰追寻其第一推动。同时，科学的这种追求精神本身，又成为社会发展和人类进步的一种最基本的推动。

科学总是寻求发现和了解客观世界的新现象，研究和掌握新规律，总是在不懈地追求真理。科学是认真的、严谨的、实事求是的，同时，科学又是创造的。科学的最基本态度之一就是疑问，科学的最基本精神之一就是批判。

的确，科学活动，特别是自然科学活动，比起其他的人类活动来，其最基本特征就是不断进步。哪怕在其他方面倒退的时候，科学却总是进步着，即使是缓慢而艰难的进步。这表明，自然科学活动中包含着人类的最进步因素。

正是在这个意义上，科学堪称为人类进步的“第一推动”。

科学教育，特别是自然科学的教育，是提高人们素质的重要因素，是现代教育的一个核心。科学教育不仅使人获得生活和工作所需的知识和技能，更重要的是使人获得科学思想、科学精神、科学态度以及科学方法的熏陶和培养，使人获得非生物本能的智慧，获得非与生俱来的灵魂。可以这样说，没有科学的“教育”，只是培养信仰，而不是教育。没有受过科学教育的人，只能称为受过训练，而非受过教育。

正是在这个意义上，科学堪称为使人进化为现代人的“第一推动”。

近百年来，无数仁人志士意识到，强国富民再造中国离不开科学技术，他们为摆脱愚昧与无知做了艰苦卓绝的奋斗。中国的科学先贤们代代相传，不遗余力地为中国的进步献身于科学启蒙运动，以图完成国人的强国梦。然而可以说，这个目标远未达到。今日的中国需要新的科学启蒙，需要现代科学教育。只有全社会的人具备较高的科学素质，以科

学的精神和思想、科学的态度和方法作为探讨和解决各类问题的共同基础和出发点，社会才能更好地向前发展和进步。因此，中国的进步离不开科学，是毋庸置疑的。

正是在这个意义上，似乎可以说，科学已被公认是中国进步所必不可少的推动。

然而，这并不意味着，科学的精神也同样地被公认和接受。虽然，科学已渗透到社会的各个领域和层面，科学的价值和地位也更高了，但是，毋庸讳言，在一定的范围内或某些特定时候，人们只是承认“科学是有用的”，只停留在对科学所带来的结果的接受和承认，而不是对科学的原动力——科学的精神的接受和承认。此种现象的存在也是不能忽视的。

科学的精神之一，是它自身就是自身的“第一推动”。也就是说，科学活动在原则上不隶属于服务于神学，不隶属于服务于儒学，科学活动在原则上也不隶属于服务于任何哲学。科学是超越宗教差别的，超越民族差别的，超越党派差别的，超越文化和地域差别的，科学是普适的、独立的，它自身就是自身的主宰。

湖南科学技术出版社精选了一批关于科学思想和科学精神的世界名著，请有关学者译成中文出版，其目的就是为了传播科学精神和科学思想，特别是自然科学的精神和思想，从而起到倡导科学精神，推动科技发展，对全民进行新的科学启蒙和科学教育的作用，为中国的进步做一点推动。丛书定名为“第一推动”，当然并非说其中每一册都是第一推动，但是可以肯定，蕴含在每一册中的科学的内容、观点、思想和精神，都会使你或多或少地更接近第一推动，或多或少地发现自身如何成为自身的主宰。

再版序　一个坠落苹果的两面：极端智慧与极致想象

龚曙光

2017年9月8日凌晨于抱朴庐

连我们自己也很惊讶，《第一推动丛书》已经出了25年。

或许，因为全神贯注于每一本书的编辑和出版细节，反倒忽视了这套丛书的出版历程，忽视了自己头上的黑发渐染霜雪，忽视了团队编辑的老退新替，忽视好些早年的读者已经成长为多个领域的栋梁。

对于一套丛书的出版而言，25年的确是一段不短的历程；对于科学研究的进程而言，四分之一个世纪更是一部跨越式的历史。古人“洞中方七日，世上已千秋”的时间感，用来形容人类科学探求的速律，倒也恰当和准确。回头看看我们逐年出版的这些科普著作，许多当年的假设已经被证实，也有一些结论被证伪；许多当年的理论已经被孵化，也有一些发明被淘汰……

无论这些著作阐释的学科和学说属于以上所说的哪种状况，都本质地呈现了科学探索的旨趣与真相：科学永远是一个求真的过程，所谓的真理，都只是这一过程中的阶段性成果。论证被想象讪笑，结论被假设挑衅，人类以其最优越的物种秉赋——智慧，让锐利无比的理性之刃，和绚烂无比的想象之花相克相生，相否相成。在形形色色的生活中，似乎没有哪一个领域如同科学探索一样，既是一次次伟大的理性历险，又是一次次极致的感性审美。科学家们穷其毕生所奉献的，不仅仅是我们无法发现的科学结论，还是我们无法展开的绚丽想象。在我们难以感知的极小与极大世界中，没有他们记历这些伟大历险和极致审美的科普著作，我们不但永远无法洞悉我们赖以生存世界的各种奥秘，无法领略我们难以抵达世界的各种美丽，更无法认知人类在找到真理和遭遇美景时的心路历程。在这个意义上，科普是人类极端智慧和极致审美的结晶，是物种独有的精神文本，是人类任何其他创造——神学、哲学、文学和

艺术无法替代的文明载体。

在神学家给出“我是谁”的结论后，整个人类，不仅仅是科学家，包括庸常生活中的我们，都企图突破宗教教义的铁窗，自由探求世界的本质。于是，时间、物质和本源，成为了人类共同的终极探寻之地，成为了人类突破慵懒、挣脱琐碎、拒绝因袭的历险之旅。这一旅程中，引领着我们艰难而快乐前行的，是那一代又一代最伟大的科学家。他们是极端的智者和极致的幻想家，是真理的先知和审美的天使。

我曾有幸采访《时间简史》的作者史蒂芬·霍金，他痛苦地斜躺在轮椅上，用特制的语音器和我交谈。聆听着由他按击出的极其单调的金属般的音符，我确信，那个只留下萎缩的躯干和游丝一般生命气息的智者就是先知，就是上帝遣派给人类的孤独使者。倘若不是亲眼所见，你根本无法相信，那些深奥到极致而又浅白到极致，简练到极致而又美丽到极致的天书，竟是他蜷缩在轮椅上，用唯一能够动弹的手指，一个语音一个语音按击出来的。如果不是为了引导人类，你想象不出他人生此行还能有其他的目的。

无怪《时间简史》如此畅销！自出版始，每年都在中文图书的畅销榜上。其实何止《时间简史》，霍金的其他著作，《第一推动丛书》所遴选的其他作者著作，25年来都在热销。据此我们相信，这些著作不仅属于某一代人，甚至不仅属于20世纪。只要人类仍在为时间、物质乃至本源的命题所困扰，只要人类仍在为求真与审美的本能所驱动，丛书中的著作，便是永不过时的启蒙读本，永不熄灭的引领之光。虽然著作中的某些假说会被否定，某些理论会被超越，但科学家们探求真理的精神，思考宇宙的智慧，感悟时空的审美，必将与日月同辉，成为人类进化中永不腐朽的历史界碑。

因而在25年这一时间节点上，我们合集再版这套丛书，便不只是为了纪念出版行为本身，更多的则是为了彰显这些著作的不朽，为了向新的时代和新的读者告白：21世纪不仅需要科学的功利，而且需要科学的审美。

当然，我们深知，并非所有的发现都为人类带来福祉，并非所有的创造都为世界带来安宁。在科学仍在为政治集团和经济集团所利用，甚至垄断的时代，初衷与结果悖反、无辜与有罪并存的科学公案屡见不鲜。对于科学可能带来的负能量，只能由了解科技的公民用群体的意愿

抑制和抵消：选择推进人类进化的科学方向，选择造福人类生存的科学发现，是每个现代公民对自己，也是对物种应当肩负的一份责任、应该表达的一种诉求！在这一理解上，我们将科普阅读不仅视为一种个人爱好，而且视为一种公共使命！

牛顿站在苹果树下，在苹果坠落的那一刹那，他的顿悟一定不只包含了对于地心引力的推断，而且包含了对于苹果与地球、地球与行星、行星与未知宇宙奇妙关系的想象。我相信，那不仅仅是一次枯燥之极的理性推演，而且是一次瑰丽之极的感性审美……

如果说，求真与审美，是这套丛书难以评估的价值，那么，极端的智慧与极致的想象，则是这套丛书无法穷尽的魅力！

出版者前言

马丁·戴维斯　伯克利

2000年1月2日

史蒂芬·霍金在他辉煌的畅销书《时间简史》中完全改变了我们有关物理学、宇宙和实在本身的观念。这位被广泛尊崇为自爱因斯坦以来最杰出的理论物理学家，向我们展现了当代有关宇宙的最重要的科学思想。现在史蒂芬·霍金回过身来探讨时空最黑暗的区域……为我们理解宇宙揭示了一系列非同寻常的可能性。

这十三篇文章和1992年圣诞节由英国广播公司播出的访谈节目涉及从自传到纯粹科学的广泛范围。史蒂芬·霍金在他早先研究的基础上，讨论了虚时间，如何由黑洞引起婴儿宇宙的诞生以及科学家寻求完全统一理论的努力。这种理论可以预言宇宙中的一切东西。他相信，这对后人来说，会像地球是球形的一样自然。

在宇宙所展现的伟大的神秘背景下，史蒂芬·霍金还对自由意志、生命价值和死亡有独到的见解。他审视科学理论和科学幻想的融合和分歧，以及科学事实和我们自身生活的交叉面。

史蒂芬·霍金作为科学家、有良心的世界公民、人以及一如既往的严谨而富有想象力的思想家的风度在本卷文集中表露无遗。他因为运动神经细胞病也就是卢伽雷病而严重残废，这种疾病只能影响却不能限制他智力的活动：他利用特别的计算机技术把思想翻译成词句，再把词句转换成声音，这使他能写能讲，做学问，教学生，还能和他的同事合作。

史蒂芬·霍金以他特有的语言魅力、幽默、坦诚以及对自傲的厌恶，使我们对他更加了解，并让我们和他共享智力和想象历程中的激情，正是这种激情导致理解宇宙性质的崭新的方式。

译者序

杜欣欣　吴忠超

1994年4月25日

罗德岱堡　佛罗里达州

这是一本有关宇宙和它的一位探索者的书。这位探索者不是别人，正是作者本人，剑桥大学的史蒂芬·霍金。他惊天动地的学说彻底地改变了人类的宇宙观。

宇宙的演化孕育出生命、思维和智慧，宇宙之于生命，犹如母亲之于婴儿。只要我们生活得稍微抽象一些，暂且忘却一下世界的无聊，就能从宇宙这本大书中读到真善美。

现代科学中最有魅力的分支是宇宙学和思维学。其根本原因是这两门科学注定要挣脱沿袭几千年的主客体分离的分析综合方法的桎梏。

宇宙是包容一切的，在它之外不存在任何东西，甚至没有时空。霍金的无边界宇宙模型是有史以来的第一个自足的宇宙模型。在这个框架中量子力学的哥本哈根的波函数坍缩理论必须加以扬弃，因为不存在宇宙之外的智慧生物。这个理论的哲学和宗教的含义是非常深远的。

哈勃红移定律表明，我们的宇宙是从发生在大约150亿年前的大爆炸膨胀而来的，而宇宙微波背景辐射正是大爆炸的残余。近年的宇宙背景探索者的探测结果显示，宇宙是极其各向同性的，其相关温度的相对起伏小于十万分之一，正是这些宝贵的起伏赋予宇宙以结构和生命。

宇宙学和黑洞是霍金的两个主要研究领域。霍金在经典物理的框架中证明了广义相对论的奇性定理和黑洞面积定理，在量子物理的框架中发现了黑洞蒸发现象并提出无边界的霍金宇宙模型。黑洞和宇宙有许多对偶之处。例如黑洞无毛定理对应于宇宙暴胀相的无毛定理，黑洞蒸发对应于宇宙的粒子生成，黑洞和暴胀相宇宙各具视界和辐射温度，等等。现在霍金提出，黑洞蒸发在某种意义上可以看成粒子通过所谓的婴

儿宇宙穿透到其他宇宙或同一宇宙的其他区域，这样就把他的两个研究领域统一起来。婴儿宇宙研究的主要成果是证明了宇宙常数必须为零，尽管当代物理学家的抱负远不止此。

宇宙学是新思想的摇篮，我们可望所有物理定律都会在此得到超越或升华。

思维学和宇宙学有某些相似之处。人们不能用思维学以外的手段来研究思维。亚里士多德无疑是古代最伟大的思维学家，近代罗素的理发师佯谬和哥德尔关于公理系统非完备性的定理是两个重要的成果。但是这个学科离成熟还非常远，人们还要等待多久才能在思维学中得到和宇宙学类似的自足体系呢？

这本书是《时间简史》的姐妹篇。因为体裁所限有些重复是难免的，但也正是在这里可以看出作者的功力，例如他至少用四种方式来解释黑洞蒸发现象。我们从本书不但可以鉴赏到作者的智慧，而且可以汲取他不屈不挠和乐观主义的进取精神。

译者之一曾经参加1980年霍金的卢卡斯教席就职典礼，霍金的讲演即收入本书第7章。由于中西方人文背景的差异，译者加了一些简略的注释。我们共花了3个月把本书译完。以上感想即作为中译本的序。

序言

史蒂芬·霍金

1993年3月31日

这一卷书是我在1976年至1992年间所写文章的结集。这些文章范围广泛，其中包括简略自传、科学哲学以及对科学和宇宙中我觉得激动人心的东西的阐释。卷末收入我参与的《荒岛唱片》访谈节目的抄本。这是英国特殊的传统之一，要求客人想象被抛弃到一座荒岛上，他或她可以选择八张唱片以供在被拯救之前消磨时光。幸运的是，我不必等待太久即可以返回到文明中来。

因为这些文章的写作跨越了16年，它们反映了我当时的知识状况，我希望我的知识在这些年里与日俱增，因此我注明了每篇文章的写作日期和场合。由于每篇文章都是自足的，所以某种程度的重复是不可避免的。我已试图减少这种情况，但仍然残留一些。

本卷的许多文章是发言稿。以前我的声音十分模糊，做讲演和学术报告不得不通过另一个人，通常是我的一名能理解我的研究生，由他宣读我的讲稿。然而，1985年我动了一次手术后，完全丧失了讲话能力。我在一段时间内没有任何交流手段。后来，人们为我安装了一个计算机系统和高质量的语言合成器。使我惊讶的是，我发现自己成为一位成功的公众演讲家，对很多听众讲演。我喜欢解释科学和回答问题。我知道还有许多改善的余地，但我希望正在改善的过程中。只要读这本书，你就能判断我是否在改善。

我不同意这样的观点，说宇宙是神秘的，它是某种人们可有直觉却永远不能完全分析和理解的东西。我觉得，这种观点没有正确认识近400年前由伽利略创始而由牛顿发扬光大的科学革命。他们指出，至少宇宙中的某些领域不是为所欲为的，它们被精确的数学法则所制约。之后的岁月里，我们已经把伽利略和牛顿的业绩推广到宇宙中几乎每个领域。我们现在拥有了制约我们日常经验的任何事物的数学法则。我们成功的标志之一便是，我们现在必须耗费几十亿美元建造庞大的机器，用

于把粒子加速到很高的能量，高到我们尚未知道这种粒子碰撞时会发生什么。在地球上正常情况下不会出现这样高的粒子能量，所以花费大量金钱去研究它们似乎显得有些学究气和不必要。但是，它们会发生在早期宇宙中，所以要理解我们和宇宙如何开始，就必须认识在这些能量下会发生什么。

我们对于宇宙还有大量无知或不解之处。但是我们过去尤其是100年内所取得的显著的进步，足以使人相信，我们有能力完全理解宇宙。我们不会永远在黑暗中摸索。我们会在宇宙的完备理论上取得突破。那样，我们就真正成为宇宙的主宰。

本卷中的科学文章是基于这样的信念，即宇宙由秩序所制约，我们现在能部分地，而且在不太远的将来能完全地理解这种秩序。也许这种希望只不过是海市蜃楼；也许根本就没有终极理论，而且即便有我们也找不到。但是努力寻求完整的理解总比对人类精神的绝望要好得多。

第1章　童年[1]

我出生于1942年1月8日，这一天刚好是伽利略的300年忌日。然而，我估计大约有20万个婴儿也在同日诞生，我不知道他们中是否有人在长大后对天文学感兴趣。尽管我的父母当时住在伦敦，但我却是在牛津出生的。这是由于第二次世界大战之时，德国作为对英国不轰炸海德堡和哥廷根的回报，承诺不轰炸牛津和剑桥，所以当时牛津是个安全的出生地。可惜的是，英德两国这类文明的协议却不能惠及更多的城市。

我父亲是约克郡人。他的祖父，也就是我的曾祖父，曾是一个富裕的农民。他曾买下太多的农场，在本世纪初农业大萧条时破产了。这次破产使我祖父母一蹶不振，但是他们仍然节衣缩食送我父亲念了牛津的医学院。之后，我父亲从事热带病研究。1937年他去了东非。第二次世界大战爆发时，他横贯非洲大陆才得以搭船回到英国，并自愿入伍了。但人们告诉他，做医学研究会更有价值。

我母亲生于苏格兰的格拉斯哥，是一位家庭医生的7个孩子中的老二。在我母亲12岁那年，他们举家迁往南方的德汶。像我父亲的家一样，她的家也从未大富大贵过。尽管如此，他们还是设法送她念了牛津大学。牛津大学毕业后，我母亲从事过各种各样的职业，包括她讨厌的查税员工作。后来她辞职做了秘书。这样她和我父亲在第二次世界大战初期相识了。

我们家住在伦敦以北的海格特。我的妹妹玛丽比我晚出生18个月。后来大人告诉我说，当时我不欢迎她的来临。由于我们之间年龄相差太少，所以我们在整个童年期间关系都有一点紧张。然而，在我们成年之后，由于各奔前程，相互之间的不愉快就化为乌有。她成了一名医生，这很讨我父亲欢心。我的更小的妹妹菲利珀出生时，我已快满5周岁，并且知道发生了什么事情。我还能记得，我盼望她的到来，这样我们三个人好在一道玩游戏。她是一个非常深沉颖悟的小孩。我总是尊重她的判断和意见。我的弟弟爱德华来得很晚，那时我已14岁了，所以他几乎根本没有进入过我的童年。他和其他三个小孩非常不同，成为完全非学术和非知识型的了。这对我们也许是件好事。他是个相当淘气的孩子，但是你不能不喜欢他。

我最早的记忆是站在海格特的拜伦宫的托儿所里号啕大哭。我周围的小孩都在玩似乎非常美妙的玩具。我想参加进去，但是我才2岁半，这是我第一回被放到不认识的人群当中去。我是父母的第一个小孩，我父母遵循育婴手册的说法，小孩在2岁时必须开始社交。所以我想我的反应一定使他们十分惊讶。度过这么糟糕的上午后，他们即把我带走，1年半之内再也没有把我送回拜伦宫。

那时，在第二次世界大战期间和结束不久，海格特是许多科学家和学术界人士的住处。他们如果在其他国家就会被称作知识分子，但是英国从未承认有过任何知识分子。所有这些父母都把孩子送到拜伦宫学校，当时这是一所非常先进的学校。我记得自己曾向父母亲抱怨过，说他们没有教我任何东西。他们不相信当时接受的填鸭式教学法，他们要你在不知不觉中学会阅读。最终我是学会了阅读，但那是8岁相当晚的年龄了。我的妹妹菲利珀是用更传统的方法学习阅读的，4岁就会了。那时候，她一定比我能干。

我们住在一幢又高又窄的维多利亚式的房子里。这是我父母亲在战时以非常廉价买下的，那时所有人都认为伦敦会被炸平。事实上，一枚V-2火箭落在离我们几幢房子远的地方。当时我和母亲以及妹妹都不在，而我的父亲在房子里。幸运的是，他没有受伤，房子也未受重创。有好几年的时间路上一直遗留一个大弹坑，我经常和我的朋友霍佛在里面玩，他家在另一方向，和我家隔三个门。霍佛无疑为我揭开了一个新天地，因为他的父母不是知识分子，不像我所认识的其他小孩的父母那样。他上公立学校，而不是拜伦宫，他通晓足球和拳击，这些都是我父母坚决禁止的运动。

另一个童年的回忆是得到我的第一列玩具火车。战时不制造玩具，至少不对国内市场。但是，我对模型火车极其着迷。我父亲为我做了一列木头火车，这并不使我满足，因为我想要一列会开动的。所以我父亲搞到一列二手的带发条的火车，焊好后给我作为圣诞礼物，那时我快满3岁了。那火车不能很好行驶。战事刚结束我父亲就去了美国，在乘“玛丽皇后”的归途中，他为我母亲买了一些尼龙，当时在英国得不到尼龙。他给我妹妹玛丽买回一个玩具娃娃，这个玩具娃娃一躺下就把眼睛闭上。他为我买了一列美国火车，还带有排障器和8字形的轨道。我还能记得自己在打开盒子时的兴奋。

发条火车似乎是尽善尽美了，但是我真正想要的是电动火车。我经

常花好几个钟头观看海格特附近克劳奇巷尾的模型铁路俱乐部展览。电动火车是我梦寐以求的东西。最后，当我父母亲都不在家的时候，我把存在邮局银行的非常有限的钱全部取出，这是大家在特殊场合譬如我受洗礼时给我的。我用这些钱买了一列电动火车，但使人沮丧的是，它运行得不怎么好。今天我们知道了顾客的权益，我应该把它送回，要求商店或者厂家换一列。但是在那个时候，人们以为买东西便是一种特权，如果商品有毛病的话，就只能怪你运气欠佳。这样我花钱修理引擎的电动马达，它却从未正常工作过。

后来，在我十几岁时，我制作了模型飞机和轮船。我的手工从来就不灵巧，这是和我的学友约翰·马克连纳汉合作的。他比我能干得多；而且他父亲在家里有一个车间。我的目标总是建造我能控制的可以开动的模型。我不在乎其外观如何。我想正是同样的冲动驱使我和另外一位学友罗杰·费尼霍弗去发明一系列非常复杂的游戏。有一种制作游戏，还包括制造不同颜色零件的工厂，运载产品的公路铁路以及股票市场。有一种战争游戏是在有4000个方格的纸板上玩的。甚至还有一种封建游戏，每一个参与者都是一个带有家谱的皇朝。我想这些游戏以及火车、轮船和飞机都来自我对探究事物和控制它们的渴望。从我开始攻读博士之后，这种渴求才在宇宙学研究中得到满足。如果你理解宇宙如何运行，你就有些控制它了。

1950年我父亲工作的地点从海格特附近的汉姆斯达德迁到伦敦北界的碾坊山新建的国立药物研究所。看来迁到伦敦郊区再通勤到城里比从海格特向外面通勤更方便些。我父母亲因此在教堂城圣阿尔班斯购买了一幢房子，大约在碾坊山以北10英里（1英里＝1.61千米）以及伦敦以北20英里的地方。这是一幢颇为典雅颇具特色的巨大的维多利亚时代的房子。我父母买房子时手头并不富裕，所以在我们迁进去之前要做许多修缮。此后我的父亲如同他的约克郡老乡一样，再也不愿花钱作任何修缮。他自己尽量地维护并油漆房子，但是房子太大而且他又不擅此道。然而，房子建得很牢固，所以能经受得了多年失修。1985年父亲病得很重时（他死于1986年），我父母把它卖掉了。我最近还看到它。似乎从那时以后就没有整修过，但是看起来却没有什么改变。

这幢房子是为带仆人的家庭设计的。在食物室里有一块指示板，上面可以显示哪个房间在按铃。我们当然雇不起佣人，我的第一个卧室是L形状的小屋，大概以前是女佣的房间。我的表姐萨拉建议我要这个房

间，她比我稍大些，我非常崇拜她。她说我们在那里会很开心。这间房子的一个吸引人之处是，可以从窗户爬到外面的自行车车库的房顶上，然后下到地面上来。

萨拉是我母亲的姐姐詹尼特的女儿。姨妈是医生，她和一个心理分析家结了婚。他们住在哈本顿的一幢相似的房子里，那是再往北五英里的一个村庄。他们是我们搬到圣阿尔班斯的一个原因。使我得以接近萨拉真是个大奖赏。我时常乘公共汽车去哈本顿。圣阿尔班斯本身紧邻罗马古城委鲁拉明遗址，那是除了伦敦以外的罗马人在英国的最重要驻地。中世纪时这儿有英国最富有的寺院。这个城市是围绕着圣阿尔班斯的陵墓建筑起来的，他是一名罗马军官，据说是第一个在英国因信仰耶稣而被处死的人。寺院残留下的只是非常大且相当丑陋的教堂以及老寺院正门的建筑物，后者成为圣阿尔班斯学校的一部分，我后来就在这里上学。

圣阿尔班斯和海格特或哈本顿相比较是有点枯燥而保守的地方。我父母在这里几乎没有朋友。这应该部分怪他们自己，因为他们尤其是我父亲天性孤僻。但是这也反映了这儿的居民是不同的，我的圣阿尔班斯同学的父母中几乎没有一个称得上知识分子。

我们家在海格特显得相当正常，而在圣阿尔班斯一定被认为是怪异的。这种看法因为我父亲的行为而得到加强，他只要能省钱就根本不在乎外表。在他年幼时家境曾经非常穷困，这给他留下终身的印象。他不能忍受为了自身的舒服而花钱，甚至直到晚年他有能力这么做时也是如此。他拒绝安装中心取暖系统，尽管他觉得非常冷。他宁愿在他通常衣服之外再罩上几件毛衣和一件睡衣，但是他对别人却非常慷慨。

在20世纪50年代他觉得买不起新车，所以就购买了一辆战前的伦敦的出租车，他和我用波纹金属板建成一座车房。邻居被激怒了，但是他们无法阻止我们。我和多数孩子一样需要群体活动，但是我为父母感到难为情，而他们却从未为此担心过。

我第一次到圣阿尔班斯时，被送到女子高级学校去，这个学校也收10岁以下的男孩。我在那里上了一学期之后，我父亲又要进行几乎一年一度的非洲走访，这一回需要大约4个月的相当长的时间。我母亲不想被留下这么长时间，这样她就带着我的两个妹妹和我去看望她的学友贝瑞尔，贝瑞尔是诗人罗伯特·格雷夫斯的妻子。他们住在西班牙马约嘉岛

的一个叫德雅韵村庄上。这是战后才5年的事，曾与希特勒和墨索里尼同盟的西班牙的独裁者佛朗西斯科·佛朗哥尚在台上。（事实上，之后他仍掌权20多年。）尽管如此，曾在战前参加过共产主义青年团的我的母亲，携带着这三个子女乘轮船火车抵达马约嘉。我们在德雅韵租了一幢房子，度过了快乐的时光。我和罗伯特的儿子威廉共有一位导师。这位导师是罗伯特的门徒，他对为爱丁堡戏剧节写剧本比对教导我们更感兴趣。所以他每天布置我们阅读一章《圣经》并写一篇作文。他的想法是教我们英国语言的美。在我离开之前我们学完了全部《创世记》和部分《出埃及记》。我从这儿学到的主要东西便是造句时不用“还有”起头。我指出在《圣经》中多数文章都是以“还有”起头的，但是我被告知英文从詹姆士王之后即改变了。我争辩道，如果情形如此，为何强迫我们念《圣经》？但这一切都是徒劳的。那时候罗伯特·格雷夫斯十分沉迷于《圣经》的象征主义和神秘主义。

当我们从马约嘉回来后，我又在另一所学校上了1年，然后我参加了所谓的十一加考试。这是那时一种对所有要进国立学校的孩子进行的智力测验。主要是因为一些中产阶级的孩子通不过并被送进非学术性的学校，所以现在这种测验已被取消。但是我的表现在测验中比在课程中要优异得多，所以就通过了十一加考试，允许在当时的圣阿尔班斯学校免费就读。

我13岁时父亲要我去考西敏学校，这是一所主要的付费住校的——也就是私立学校。那时候的教育很讲究门第。父亲觉得，由于他没有权势，使得许多能力不如而门第更高的人爬到他前面去了。因为我父母不甚富裕，所以我必须获得奖学金。然而，由于我在奖学金考试时生病，所以未能参加。我只好留在圣阿尔班斯学校。我在那里受到的教育至少和西敏学校一样好。我从未觉得自己的出身的平凡成为人生的障碍。

那时的英国教育是等级森严的。学校不但被分成学术的和非学术的，而且学术学校还分成A、B和C等。这对A等的学生非常有利，对B等的学生就不怎么有利，而对不受鼓励的C等学生则非常不利。我因为十一加考得好被分配到A等中。但是1年后班级里第二十名以下的所有学生都被刷到B等去。这对他们的自信心是一个巨大的打击，有些人再也没有恢复过来。我在圣阿尔班斯的前两个学期分别是第二十四名和第二十三名，但是在第三学期变到第十八名。就这样侥幸逃脱。

我在班级里从未名列在前一半过（这是一个非常优秀的班级）。我

的作业很不整洁，老师觉得我的书写无可救药。但是同学们给我的绰号是爱因斯坦，可能他们看出某些更好的征兆。当我12岁时，我的两位朋友用一袋糖果打赌，说我永远不可能成才。我不知道这桩赌事是否已经尘埃落定，如果是这样的话，何方取胜呢。

我有六七位好朋友，我和他们中的多数迄今仍有联系。我们通常进行长时间的讨论和争论，主题涵盖一切，从无线电遥控模型到宗教，从灵学到物理学。我们谈论的一件事是关于宇宙的起源以及是否需要上帝去创生它再使它运行。我听说从遥远星系来的光线向光谱红端移动，而且这种现象被认为表示宇宙正在膨胀。（向蓝端的移动被认为是在收缩。）但是我断定红移必定是由其他原因引起的。也许光线在传播到我们的路途中累了并且变得更红了。一个本质上不变的并且永存的宇宙显得更为自然得多。只有在我进行了两年博士研究之后才意识到过去错了。

在我进入学校的最后2年，我才定下数理专业。有一位非常具有启发性的数学老师，我们叫他塔他先生。学校刚建了一间数学之家，被用作数学小组的教室。但是我父亲对此极为反对。他认为数学家除了教书之外找不到工作。他确实希望我从事医学，但是我对生物学毫无兴趣，对我而言这个学科过于叙述性并且不够基础，而且在学校的地位很低。我父亲知道我不愿学生物学，但是他让我学化学和少量数学。他觉得这样可让我将来在学科上再作选择留下余地。我现在是一名数学教授，但自从我17岁离开圣阿尔班斯学校之后再也没有正式上过数学课。在数学方面我必须做到需要什么就吸收什么。我曾经在剑桥指导过本科生，只要在进度上比他们提前一个礼拜即可以了。

我父亲从事热带病的研究。他有时带我上他在碾坊山的实验室。我很喜欢这个，尤其是通过显微镜做观察。他还带我去昆虫馆，他养一些染上热带病的蚊子。因为我总觉得有一些蚊子到处乱飞，所以很担心。他非常勤奋并且专心致志于研究。因为他觉得其他有背景和关系但不如他的人爬到他上头去，所以有些怨恨。他经常警告我要提防这种人。但是我认为物理学和医学略有不同。你上哪个学校以及和谁有关系是无所谓的。关键在于你的成果。

我总是对事物的如何运行深感兴趣，经常把东西拆开以穷根究底，但在再把它们恢复组装回去时束手无策。我的实际能力从来跟不上我的理论探讨。我的父亲鼓励我在科学上的兴趣，甚至在他的知识范围内在

数学上训练我。有这样的背景再加上父亲的工作，我要进入科学研究就是水到渠成的事。在我幼年时我对所有学科都一视同仁。十三四岁后我知道自己要在物理学方面作研究，因为这是最基础的科学，尽管我知道中学物理太容易太浅显所以最枯燥。化学就好玩得多了，不断发生许多意料之外的事，如爆炸等。但是物理学和天文学有望解决我们从何处来和为何在这里的问题。我想探索宇宙的底蕴。也许我在一个小的程度上获得了成功，但是还有大量问题有待研究。

第2章　牛津和剑桥

我父亲非常希望我能进牛津或剑桥。他本人上过牛津的大学学院，所以他认为我应该申请这个学院，这样我被接受的机会更大些。那时大学学院没有数学的研究员，这是他要我学习化学的另一个原因：我可以尝试获得自然科学而非数学方面的奖学金。

我的家人去了印度一年，但是我必须留下准备A水平和大学入学的考试。我的校长认为我去投考牛津太过年轻，但是在1959年3月我还是和学校中另外两个比我高一届的男孩参加了奖学金考试。大学监考讲师在实验考试时和其他人讲话而不理我，我相信我考得很糟，所以非常沮丧，在从牛津回家后几天，我收到了一封电报，说我得到了奖学金。

我那时17岁，同年级同学中的大多数都服过役，所以比我大许多。在大学第一年以及第二年的部分时间里我觉得相当孤单。只有到了第三年我才真正感到快乐。当时笼罩牛津的气氛是极端厌学。你要么聪明而不必用功，要么就甘心承认自己不行，得四等成绩。靠用功而得到好分数被认为是灰人，那是牛津词汇中最坏的诨名。

那时牛津的物理学课程安排得特别容易，你可以毫不用功。在牛津上学的三年中只在刚入学和快结束时各考一回。我曾计算过，三年期间我总共用了一千小时的功，也就是平均每天一小时。我并不为我的懒惰感到自豪。我只不过描述当时我和大多数同学的共同态度：对一切完全厌倦并觉得没有任何值得努力追求的东西。我的疾病的一个结果就是把这一切都改变了：当你面临着夭折的可能时，你就会意识到，生命是宝贵的，你有大量的事情要做。

因为我没有用功，为了通过期终考，我就打算研究理论物理的问题，避免记忆性的知识。可是，考试前夜我由于神经紧张而失眠，因此考得不很好。我处于第一等和第二等的中间，所以必须接受考官的面试才能最后决定。他们在面试时问我未来的计划。我回答说要做研究。如果他们给我一等，我就去剑桥。如果我只得到二等，我则留在牛津。他们给了我一等。

我觉得理论物理中有两个可能的领域是基本的，我可以做研究的，

一个是研究非常大尺度的宇宙学，另一个是研究非常小尺度的基本粒子。因为基本粒子在那时缺乏合适的理论，所以我认为它不那么吸引人。虽然科学家发现许多新粒子，他们能做的只不过是和植物学一样把各种粒子分门别类。相反地，在宇宙学方面已有一个很好确立的理论，即爱因斯坦的广义相对论。

当时在牛津没人研究宇宙学，而在剑桥的弗雷得·霍伊尔却是英国当代最杰出的天文学家。所以我申请跟霍伊尔做博士论文。我到剑桥做研究的申请被接受了，其先决条件是我要得到第一等成绩。但是使我恼火的是，我的导师不是霍伊尔，而是邓尼斯·西阿玛，我以前没有听说过他。然而，最后发现这是最佳的安排。霍伊尔经常在国外，我也许不能经常见到他。另一方面，西阿玛总在那里，他的教导总是发人深省，尽管我们之间经常意见相左。

因为我在学校和牛津并没有学到许多数学，所以开始时发现广义相对论非常艰深，进展缓慢。此外，我在牛津的最后一年发现自己的行动越来越笨拙。到了剑桥不久即被诊断患了肌肉萎缩性侧面硬化病，在英国称作运动神经细胞病。（在美国又称作卢伽雷病。）医生对于治愈甚至控制它的恶化都束手无策。

最初这种病恶化得相当迅速。因为我预料自己不会活到结束博士论文，所以看来没有必要作研究。然而，随着时间的过去，这种病的恶化似乎减慢了下来。我还开始理解了广义相对论并在研究上有所进展。真正使我生活改观的是我和一位名叫简·瓦尔德的姑娘订婚。我邂逅她之时大约便是诊断得了运动神经细胞病前后。这就使我有了一些活头。

但是为了结婚，我需要一份工作，为了得到工作，需要一个博士学位。因此在我的一生中首次开始用功。令我惊讶的是，我发现自己喜欢研究。也许把它称作工作是不公平的。有人说道：科学家和妓女都为他们喜爱的职业得到报酬。

我向龚维尔和凯尔斯（发音作基斯）学院申请研究奖金。我希望简能为我打印申请，可她来剑桥看望我时，她的手臂因为骨折打上石膏。我必须承认，我应对她更为体贴才对。还好，她是伤了左臂，所以她还能按照我的口授填好申请表，我再另请人打字。

我在申请时必须列入两个人的名字作为我的研究的推荐人。我的导

师建议我应该请赫曼·邦迪作为其中之一。邦迪那时是伦敦国王学院的数学教授，他是一名广义相对论专家。我见过他两回，他还为我提交过要在《皇家学会会报》上发表的一篇文章。有一次他在剑桥演讲后，我向他要求此事，他以迷惑的眼神凝视我，然后答应说可以。他显然遗忘了我，因为当学院写信问他时，他回答说没有听说过我。现在，有这么多人申请学院的研究奖金，如果候选人的推荐人中有一人说对他不了解，他也就不会有机会了。但是那时竞争没有这么激烈。学院写信通知我此推荐人的难堪的答复，而我的导师到邦迪那儿去使他回想起我来。邦迪后来为我写了一封也许太过溢美的推荐信。我如愿得到了研究奖金，从此以后就一直是凯尔斯学院的研究员。

得到了研究奖金意味着我能和简结婚了。1965年7月我们完婚了。我们在苏福克度了一周蜜月，这是我们仅能负担的。后来我们去了纽约州的康奈尔大学举行的广义相对论暑期班。这是一个错误。我们住的宿舍尽是些带着哭闹小孩的夫妻，这使我们的新婚生活不甚愉快。不过，这个暑期班在其他方面对我们非常有益，因为我结识了许多该领域的头面人物。

直至1970年我的研究集中于宇宙学，也就是在大尺度上研究宇宙。这个时期我最重要的成果是关于奇性。对遥远星系的观测表明它们正远离我们而去：宇宙正在膨胀。这说明在过去这些星系必然更加相近。这就产生了这个问题：是否有过一个时刻，所有星系都相互重叠在一起，而宇宙的密度是无限的？或者早先是否存在一个收缩相，在这个收缩相中这些星系想法避免相互对撞？也许它们相互穿越，然而再相互离开。要回答这个问题需要新的数学技巧。这些就是在1965年和1970年之间主要由罗杰·彭罗斯和我自己所发展的。彭罗斯那时在伦敦的比尔贝克学院，现在他在牛津。我们用这些技巧来证明，如果广义相对论是正确的话，则在过去必然存在过一个无限密度的状态。

这个无限密度的状态被叫作大爆炸奇性。它意味着，如果广义相对论是正确的，则科学不能预言宇宙是如何起始的。然而，我更新近的研究成果表明，如果人们考虑到量子物理理论，这个有关非常小尺度的理论，则可能预言宇宙是如何起始的。

广义相对论还预言，当大质量恒星耗尽其核燃料时将会向自身坍缩。彭罗斯和我证明了，它们会继续坍缩直到具有无限密度的奇点。至少对恒星和它上面的一切，这个奇点即时间的终点。奇点的引力场是如

此之强，甚至光线都不能从围绕它的区域逃逸，它被引力场拉回去。不可能从该处逃逸的区域就叫作黑洞，黑洞的边界叫作事件视界。任何通过事件视界掉进黑洞的东西或人都在奇点达到其时间的终结。

1970年的一个晚上，当我要上床之时思考黑洞的问题，那是我的女儿露西诞生不久的事。我忽然意识到，彭罗斯和我发展的用于证明奇性的技巧可以适用于黑洞。特别是，黑洞的边界，即事件视界的面积不会随时间减小。而且当两颗黑洞碰撞并合并成一颗单独的黑洞时，最终黑洞的视界面积比原先两颗黑洞的视界面积的和更大。这就为黑洞碰撞时可能发射的能量立下了一个重要的限制。那个晚上我激动得难以入眠。

从1970年到1974年我主要研究黑洞。但是在1974年我也许做了毕生最令人吃惊的发现：黑洞不是完全黑的！当人们考虑物质的小尺度行为时，粒子和辐射可以从黑洞漏出来。黑洞如同一个热体似地会发射辐射。

1974年之后，我从事把广义相对论和量子力学合并成一个协调理论的研究。其中一个结果便是我和加利福尼亚大学圣地巴巴拉分校的詹姆·哈特尔在1983年提出的一个设想：无论时间还是空间在范围上都是有限的，但是它们没有任何边界。它们像是地球的表面，只不过多了两维。地球表面具有有限的面积，但是没有任何边界。在我的所有旅行中，我从未落到世界的边缘外去。如果这个设想是正确的，就不存在奇性，科学定律就处处有效，包括宇宙的开端在内。宇宙起始的方式就完全由科学定律所确定。我也就实现了发现宇宙如何起始的抱负。但是我仍然不知道它为什么起始。

第3章　我的病历[2]

人们经常问我：运动神经细胞病对你有多大的影响？我的回答是，不很大。我尽量地过一个正常人的生活，不去想我的病况或者为这种病阻碍我实现的事情懊丧，这样的事情不怎么多。

我被发现患了运动神经细胞病，这对我无疑是晴天霹雳。我在童年时动作一直不能自如。我对球类都不行，也许是因为这个原因我不在乎体育运动。但是，我进牛津后情形似乎有所改变。我参与掌舵和划船。我虽然没有达到赛船的标准，但是达到了学院间比赛的水平。

但是在牛津上第三年时，我注意到自己变得更笨拙了，有一两回无缘无故地跌倒。直到第二年到剑桥后，我母亲才注意到并把我送到家庭医生那里去。他又把我介绍给一名专家，在我的21岁生日后不久即入院检查。我住了两周医院，其间进行各式各样的检查。他们从我的手臂上取下了肌肉样品，把电极插在我身上，把一些对辐射不透明的流体注入我的脊柱中，一面使床倾斜，一面用X光来观察这流体上上下下流动。做过了这一切以后，除了告诉我说这不是多发性硬化，并且是非典型的情形外，没有告诉我患了什么病。然而，我合计出，他们估计病情还会继续恶化，除了给我一些维生素外束手无策。我能看出他们预料维生素无济于事。这种病况显然不很妙，所以我也就不想寻根究底。

意识到我得了不治之症并很可能在几年内要结束我的性命，对我真是致命打击。这种事情怎么会发生在我身上呢？为什么我要这样地夭折呢？然而，住院期间我目睹在我对面床上一个我有点认识的男孩死于肺炎。这是个令人伤心的场合。很清楚，有些人比我更悲惨。我的病情至少没有使我觉得生病。每当我觉得自哀自怜，就会想到那个男孩。

不知什么灾难还在前头，也不知病情恶化的速率，我不知所措。医生告诉我回剑桥去继续我刚开始的在广义相对论和宇宙学方面的研究。但是，由于我的数学背景不够，所以进展缓慢，而且无论如何，我也许活不到完成博士论文。我感到十分倒霉。我就去听瓦格纳的音乐。但是杂志说我酗酒是过于夸张了。麻烦在于，一旦有一篇文章这么说，另外的文章就照抄，这样可以起轰动效应。似乎在印刷物上出现多次的东西都必定是真的。

那时我老做噩梦。在我的病况诊断之前，我就已经对生活非常厌倦了。似乎没有任何值得做的事。我出院后不久，即做了一场自己被处死的梦。我突然意识到，如果我被赦免的话，我还能做许多有价值的事。另一场我做了好几次的梦，是我要牺牲自己的生命去拯救他人。毕竟，如果我就要死了，做点善事也是值得的。

但是，我没死。事实上，虽然我的将来总是笼罩在阴云之下，但我惊讶地发现，我现在比过去更加享受生活。我在研究上取得进展。我订婚并且结婚，我还从剑桥的凯尔斯学院得到一份研究奖金。

凯尔斯学院的研究奖金及时解决了我的生计问题。选择理论物理作为研究领域是我的好运气，因为这是我的病情不会成为很严重阻碍的少数领域之一。而且幸运的是，在我的残疾越来越严重的同时，我的科学声望越来越高。这意味着人们准备给我一系列职务，我只要作研究，不必讲课。

我们在住房方面也很走运。我们结婚的时候，简仍然是伦敦的威斯特费尔德学院的一名本科生，所以她周中必须去伦敦。因为我不能走很远。这就表明我要找到位于中心的能够料理自己的地方。我向学院求助过，但是当时的财务长告诉我，学院不替研究员找住房。我们就以自己的名义预租正在市场建造的一组新公寓中的一间。（几年后，我发现这些公寓实际上是学院所有的，但是他们没有告知我这些。）然而，当我们在美国过完夏天返回剑桥之时，这些公寓还未就绪。这位财务长做了一个巨大的让步，让我们住进研究生宿舍的一个房间。他说："这个房间一个晚上我们正常收费十二先令六便士。但是，由于你们两个人住在这个房间，所以收费二十五先令。"

我们只在那里住了三夜。然后我们在离我大学的系大约100码（1码＝0.9144米）的地方找到一幢小房子。它属于另一个学院，并租给了它的一位研究员。他最近搬到郊区的一幢房子里，把他租约余下的3个月转给我们。在那3个月里，我们在同一条街上找到另一幢空置的房子。一位邻居从多塞特找到房东并告诉她，当年轻人还在为住宿苦恼时，让她的房子空置简直太不像话。这样她就把房子租给我们。我们在那里住了几年后，就想把它买下并做了装修，我们向学院申请分期贷款。学院进行了一下估算，认为风险较大。这样最后我们从建筑社得到分期贷款，而我的父母给了我装修的钱。

我们在那儿又住了4年，直到我无法攀登楼梯为止。这时候，学院更加赏识我，并且换了一个财务长。因此他们为我们提供了学院拥有的一幢房子的底层公寓。它有大房间和宽敞的门，对我很合适。它的位置足够中心，我就能够驾驶电动轮椅到我的大学的系或学院去。它还为学院园丁照管的一个花园所环绕，我们的三个孩子对此十分惬意。

直到1974年我还能自己吃饭并且上下床。简设法帮助我并在没有外助的情形下带大两个孩子。然而此后情形变得更困难，这样我们开始让我的一名研究生和我们同住。我让他们免费食宿，关注他们的研究，他们帮助我起床和上床。1980年我们变成一个小团体，其中私人护士早晚来照应一两小时。这样子一直持续到1985年我得了肺炎为止。我必须采取穿气管手术，从此我便需要全天候护理。能够做到这样是受惠于好几种基金。

我的言语在手术前已经越来越不清楚，只有少数熟悉我的人能理解。但是我至少能够交流。我依靠对秘书口授来写论文，我通过一名翻译来作学术报告，他能更清楚地重复我的话。然而，穿气管手术一下子把我的讲话能力全部剥夺了。有一阵子我唯一的交流手段是，当有人在我面前指对拼写板上我所要的字母时，我就扬起眉毛，就这样把词汇拼写出来。这样交流十分困难后，不用说写科学论文了。还好，加利福尼亚的一位名叫瓦特·沃尔托兹的电脑专家听说我的困境。他寄给我他写的一段叫作平等器的电脑程序。这就使我可以从屏幕上一系列的目录中选择词汇，只要我按手中的开关即可。这个程序也可以由头部或眼睛的动作来控制。当我积累够了我要说的，就可以把它送到语言合成器中去。

最初我只在台式计算机上运行平等器的程序。后来，剑桥调节通讯公司的大卫·梅森把一台很小的个人电脑以及语言合成器装在我的轮椅上。我用这个系统交流得比过去好得多，每分钟我可造出十五个词。我可以要么把写过的说出来，要么把它存在磁碟里。我可以把它打印出来，或者把它召来一句一句地说出来。我已经使用这个系统写了两部书和一些科学论文。我还进行了一系列的科学和普及的讲演。听众的效果很好。我想，这要大大地归功于语言合成器的质量，它是由语言公司制造的。一个人的声音很重要。如果你的声音含糊，人们很可能以为你有智能缺陷。我的合成器是迄今为止我所听到的最好的，因为它会抑扬顿挫，并不像一台机器在讲话。唯一的问题是它使我说话带有美国口音。然而，现在我已经认同了它的声音。甚至如果有人要提供我英国口音，

我也不想更换。否则的话，我会觉得变成了另外的一个人。

我实际上在运动神经细胞病中度过了整个成年。但是它并未能够阻碍我有个非常温暖的家庭和成功的事业。我要十分感谢从我的妻子、孩子以及大量的朋友和组织得到的帮助。很幸运的是，我的病况比通常情形恶化得更缓慢。这表明一个人永远不要绝望。

第4章 公众的科学观[3]

不管我们喜欢不喜欢，我们生活其中的世界在过去100年间发生了剧烈的变化，看来在下个世纪这种变化还要更厉害。有些人宁愿停止这些变化，回到他们认为是更纯洁单纯的年代。但是，正如历史所昭示的，过去并非那么美好。过去对于少数特权者而言是不坏，尽管他们甚至享受不到现代医药，妇女生育也是高度危险的。但是，对于绝大多数人，生活是肮脏、野蛮而短暂的。

无论如何，即便人们向往也不可能把时钟扳回到过去。知识和技术不能就这么被忘却。人们也不能阻止将来的进步。即便所有政府都把研究经费停止（而且现任政府在这一点上做得十分地道），竞争的力量仍然会把技术向前推进。况且，人们不可能阻止好奇的头脑去思考基础科学，不管这些人是否得到报酬。防止进一步发展的唯一方法是建立压迫任何新生事物的全球独裁政府，但是人类的创造力和天才是如此之顽强，即便是这样的政府也无可奈何。充其量不过把变化的速度降低而已。

如果我们同意，无法阻止科学技术改变我们的世界，我们至少能尽量保证它们引起的变化是在正确的方向上。在一个民主社会中，这意味着公众需要对科学有基本的理解，这样做的决定才能是消息灵通，而不会只受少数专家的操纵。现今公众对待科学的态度相当矛盾。人们希望科学技术新发展继续促进生活水平的稳定提高，另一方面由于不理解而不信任科学。一位在实验室中制造弗兰肯斯坦机器人的疯子科学家的卡通人物便是这种不信任的明证。这也是支持绿党的一个背景因素。但是公众对科学，尤其是天文学兴趣盎然，这可从诸如《宇宙》电视系列片和科幻小说对大量观众的吸引力而看出。

如何利用这些兴趣向公众提供必需的科学背景，使之在诸如酸雨、温室效应、核武器和遗传工程方面做出真知灼见的决定？很清楚，根本的问题是中学基础教育。可惜中学的科学教育既枯燥又乏味。孩子们依赖死记硬背蒙混过关，根本不知道科学和他们周围世界有何相关。此外，通常需要方程才能学会科学。尽管方程是描述数学思想的简明而精确的方法和手段，但大部分人对它敬而远之。当我最近写一部通俗著作

时，有人提出忠告说，每放进一个方程都会使销售量减半。我引进了一个方程，即爱因斯坦著名的方程，$E=mc^2$。也许没有这个方程的话，我能多卖出一倍数量的书。

科学家和工程师喜欢用方程的形式表达他们的思想，因为他们需要量的准确值。但对于其他人，定性地掌握科学概念已经足够，这些概念只要通过语言和图解而不必用方程即能表达。

人们在学校中学的科学可提供一个基本框架，但是现在科学进步的节奏如此之迅速，在人们离开学校或大学之后总有新的进展。我在中学时从未学过分子生物学或晶体管，而遗传工程和计算机却是最有可能改变我们将来生活方式的两种技术。有关科学的通俗著作和杂志文章可以帮助我们知悉新发展，但是哪怕是最成功的通俗著作也只为人口中的一小部分阅读。只有电视才能触及真正广大的观众。电视中有一些非常好的科学节目，但是其他节目把科学奇迹简单地描述成魔术，而没有进行解释或者指出它们如何和科学观念的框架一致。科学节目的电视制作者应当意识到，他们不仅有娱乐公众，而且有教育公众的责任。

在最近的将来，什么是公众在和科学相关的问题上应做的决定呢？迄今为止最紧急的应是有关核武器的决定。其他的全球问题，诸如食物供给或者温室效应则是相对迟缓的，但是核战争意味着地球的全人类在几天内被消灭。冷战结束带来的东西方紧张关系的缓解意味着，核战争的恐惧已从公众意识中退出。但是只要还存在把全球人口消灭许多次的武器，这种危险仍然在那里。在苏联和美国的核武器仍然把北半球的主要城市作为毁灭目标。只要电脑出点差错或者掌握这些武器的人员不服从命令就足以引发全球战争。更令人忧虑的是现在有些弱国也得到了核武器。强国的行为相对负责任一些，但是一些弱国如利比亚或伊拉克、巴基斯坦甚至阿塞拜疆的诚信就不够高。这些国家能在不久获得的实际的核武器本身并不太可怕，尽管能炸死几百万人，这些武器仍然是相当落后的。其真正的危险在于两个小国家之间的核战争会把具有大量核储备的强国卷进去。

公众意识到这种危险性，并迫使所有政府同意大量裁军是非常重要的。把所有核武器销毁也许是不现实的，但是我们可以减少武器的数量以减少危险。

如果我们避免了核战争，仍然存在把我们消灭的其他危险。有人讲

过一个恶毒的笑话，说我们之所以未被外星人文明所接触，是因为当他们的文明达到我们的阶段时会先毁灭自己。但是我对公众的意识有充分的信任，那就是相信我们能够证明这个笑话是荒谬的。

第5章　《时间简史》之简史[4]

为庆祝我的《时间简史》所举行的招待会迄今仍然使我大吃一惊。此书已在《纽约时报》最畅销书榜上列名达37周之久，在伦敦的《星期日泰晤士报》上达28周之久（它在英国比在美国出版得晚）。它被翻译成20种文字（如果你把美语和英语相区分的话，应算作21种文字）。这大大超过我在1982年首次打算写一本有关宇宙的通俗读物时所预料的。我的部分动机是为我女儿挣一些学费。（事实上，在本书面世时，她在上学校的最后一年。）但是其主要原因是我想向人们解释，在理解宇宙方面我们已经走到多么远的地步：我们也许已经非常接近于找到描述宇宙和其中的万物的完整理论。

如果我准备花时间和精力写一本书，就要使它有尽可能多的读者。我以前的专业性的书都由剑桥大学出版社出版。那是一家出色的出版社，但是我觉得它并没有真正面向我所要触及的大众。因此，我就和一位文化经纪人，阿尔·朱克曼接触。他是作为一位同事的姻亲兄弟被介绍给我的。我给了他第1章的草稿，并对他解释道，我要使它成为在机场书摊上出售的那一种书。他告诉我说，这根本不可能。它也许很受学术界和学生的欢迎，但是要想侵入杰弗里·阿歇尔[5]的领地绝无可能。

1984年我把本书的初稿交给朱克曼。他把它送交几个出版商，并提议我接受诺顿的条件，诺顿是美国的一家相当出色的图书出版公司。但是，我接受了矮脚鸡书社的条件，这是一家更加面向大众市场的出版社。虽然矮脚鸡并不精于科学书籍，他们的出版物却遍布机场书摊。他们接受我的书的缘由可能是出于他们的一位编辑彼得·古查底的兴趣。他对自己的工作非常尽责，并让我把书重写，写成像他那样的非科学家都能理解的程度。我每回寄给他重写的章节，他都寄回一长列异议和要我澄清的问题。我好几回想这个过程将会没完没了。但是他是对的：结果这本书大大地改善了。

在我接受矮脚鸡条件之后不久，即得了肺炎。我不得不接受穿气管的手术，它使我失去说话能力。在一段时间内，我只能靠扬眉来进行交流，这时另一个人指着一块板上的字母。多亏人家赠送给我的计算机程序，才使我可能完成此书。它有一些缓慢，但是那时候我也思维得慢，

所以我们可以配合得好。我利用它几乎完全重写了初稿以回应古查底的要求。我的一位学生布里安·维特帮助我进行修改。

雅各布·布朗诺夫斯基[6]的电视系列片《人类进化》给我留下深刻印象。它简略地介绍了人类在仅仅15000年内从以前的初级野人进化到现代状态的成就。我想在朝着完全理解制约宇宙定律的进展方面，给人们传达类似的感觉。我很清楚，几乎无人不对宇宙如何运行感兴趣，但是大部分人不能理解数学方程——我本人对方程也不太在乎。其部分原因是我写方程很困难，但主要是因为我对方程缺乏直觉。相反地，我依照图像来思维，我的目标是要把这些头脑中的图像用语言在书中表达出来，并借助一些熟悉的比喻和图解。我希望用这种办法，可以让大多数人分享到过去20年间物理学的显著进步所引起的激动和成就感。

尽管避免了数学，一些思想仍然是非常陌生的、很难阐释的。我就面临着这样两难的境地：是冒着使人混淆的危险去解释，还是滑过这些难点呢？某些陌生的概念，譬如说以不同速度运动的观察者测量同样的一对事件时会得到不同的时间间隔，这个事实对于我所要描绘的图像并不是根本的。所以，我觉得只提一下而不必深入讨论。但是，其他一些困难的思想对于我所要阐述的东西至关重要。有两个概念我觉得尤其需要包括进去。第一就是所谓的对历史的求和，这就是宇宙不仅仅具有单一的历史的思想。对于宇宙而言，存在一整族所有可能的历史，而且所有这些历史都是同等实在的（不管其含义是什么）。另一个思想便是“虚时间”，它对于赋予历史求和以数学意义不可或缺。现在回想起来，当初我应多花工夫去解释这两个非常困难的概念，尤其是后者。虚时间似乎是人们在阅读此书时遭遇的最大障碍。其实，实在没有必要准确理解何为虚时间——只要认为它和我们称为实时间的不同就可以了。

在这本书即将出版之际，一位科学家收到一册预印本，他要为《自然》杂志替本书写评论，他大吃一惊地发现，该书错误百出，照片和图解的排列及编号是混乱的。他电告矮脚鸡书社，后者同样大吃一惊并决定即日全部收回已印的书并销毁。他们花了3周时间紧张地改正并重校全书，赶在4月预定的出版日期在书店推出。那时《时代》周刊刊登了我的一幅剪影。尽管如此，编辑还是为市场的需求量而惊讶。现在美国正在印第7次，而英国是10次印刷[7]。

为什么这么多人购买它呢？我本人的立场很难保证客观，所以我想列举他人所说的。我发现大多数评论虽然是好意的，却是不清晰的。他

们喜欢遵循这样的公式：史蒂芬·霍金患了卢伽雷病（美国的评论），或者运动神经细胞病（英国的评论）。他被禁锢在轮椅上，不能言语，只能挪动x根手指（这儿的x似乎从一变到三，依据评论者所读的哪篇有关我的不精确的文章而定）。然而，他写了这部关于大问题的书：我们从何处来并往何处去？霍金提供的答案是宇宙既不能创生也不能毁灭：它只是存在。霍金为了表述这个思想引进了虚时间概念，对此我（评论者）有些难于理解。尽管如此，如果霍金是对的，而且我们的确找到一套完备的统一理论，我们就真正地知道了上帝的精神。（我在看校样时差点儿删去该书的最后一句话，即我们会知道上帝的精神。如果我那么做的话，这部书的销售量就会减半。）

我觉得伦敦的报纸《独立报》的一篇文章相当清醒，它说甚至像《时间简史》这样严肃的科学著作也会变成一部巫书。我的妻子吓坏了，而我却因为写了一部人们把它和《禅与摩托车维修工艺》相比较的书而感到甚受恭维。我希望拙作和《禅》一样使人们觉得，他们不必自外于伟大的智慧及哲学的问题。

毫无疑义，对于我克服残疾而成为理论物理学家的人性好奇心起了推波助澜的作用。但是，那些基于人性好奇而购书者会大失所望，因为书中有关我的身体状况的只有两处。这本书试图成为一部宇宙史，而不是我的自传。这并没有阻止人们指责矮脚鸡可耻地利用我的疾病，并责备我作为同谋允许把照片印在封面上。事实上，在合同中我对封面毫无发言权。然而，我的确曾经鼓动矮脚鸡在英国版中用一张好的照片，把美国版的那张凄惨的过时照片换下来。但是，矮脚鸡坚持原封不动，据说美国公众已经把它和我的书相认同。

还有人说，大家购买我的书是因为读了它的评论或者它上了畅销书榜，但他们并不读它；他们只是将其放在书架或咖啡桌上，因此不需费力读通而仅是拥有它就值得炫耀。我断定会有这种情形发生，但我不知是否比大多数其他的包括《圣经》和莎士比亚著作在内的严肃书籍更甚。另一方面，我知道至少有一些人读过它，因为我每天都收到一叠有关此书的信件，许多人提出问题或者给出仔细的评论，这表明他们至少读过它，即便还不能完全理解。我还不时被街上的行人拦住，他们告诉我如何欣赏此书。当然，我比大多数作者更容易被认出，或者说更有特征，如果不是更杰出的话。但是，我受到的公众祝贺的频繁度（这使我的9岁的儿子十分困惑）似乎表明，购买此书的人士中至少有一部分的

确在阅读它。

现在人们问我下一步准备做什么。我觉得自己肯定不会写《时间简史》的续集。用什么书名呢？《时间详史》？《时间终结之后》？《时间之子》？我的经纪人建议我允许拍一部我的传记片。但是，如果让演员来饰演我们，则无论是我还是我的家人的自尊心将丧失殆尽。如果我答应并协助别人来撰写我的生平，其后果将是类似的，只不过程度减轻一些而已。当然，我不能阻止别人独立地为我作传，只要那不是诽谤性的，但是我想用自己正准备写自传的借口来应付他们。也许我真的会写。但是我不着急。毕竟还有许多优先要做的科学问题。

第6章　我的立场[8]

这篇文章不是关于我信仰上帝与否。我将讨论我对人们如何理解宇宙的认识：作为“万物理论”的大统一理论的现状和意义。这里存在一个真正的问题。研究和争论这类问题应是哲学家的天职，可惜他们多半不具备足够的数学背景，以赶上现代理论物理进展的节拍。还有一种称作科学哲学家的子族，他们的背景本应更强一些。但是，他们中的许多人是失败的物理学家，他们知道自己无能力发现新理论，所以转而写物理学的哲学。他们仍然为本世纪初的科学理论，诸如相对论和量子力学而喋喋不休。他们和物理学的当代前沿相脱节。

也许我对哲学家们过于苛刻一些，但是他们对我也不友善。我的方法被描述成天真的和头脑简单的。我在不同的场合曾被称为唯名论者、工具主义者、实证主义者、实在主义者以及其他好几种主义者。其手段似乎是借助污蔑来证伪：只要将我的方法贴上标签就可以了，不必指出何处出错。无人不知所有那些主义的致命错误。

在实际推动理论物理进展的人们并不认同哲学家和科学史家后来为他们发明的范畴。我敢断定，爱因斯坦、海森伯和狄拉克对于他们是否为实在主义者或者是工具主义者根本不在乎。他们只是关心现存的理论不能相互协调。在发展理论物理中，寻求逻辑自洽总是比实验结果更为重要。优雅而美丽的理论会因为不和观测相符而被否决，但是我从未看到任何仅仅基于实验而发展的主要理论。首先是需求优雅而协调的数学模型提出理论，然后理论作出可被观测验证的预言。如果观测和预言一致，这并未证明该理论；只不过该理论存活以做进一步的预言，新预言又要由观测来验证。如果观测和预言不符，即抛弃该理论。

或者不如说，这是应当这么发生的。但在实际中，人们非常犹豫放弃他们已投注大量时间和心血的理论。通常他们首先质询观测的精度。如果找不出毛病的话，就以想当然的方式来修正理论。该理论最终就会变成丑陋的庞然大物。然后某人提出一种新理论，所有古怪的观测都优雅而自然地在新理论中得到解释。1887年进行的迈克耳孙—莫雷实验即是一个例子，它指出不管光源与观测者如何运动，光速总是相同的。这简直莫名其妙。人们原先以为，朝着光运动比顺着光运动一定会测量出

更高的光速，然而实验的结果是，两者测量出完全一样的光速。在接着的18年间，像亨得利克·洛伦兹和乔治·费兹杰拉德等人试图把这一观测归纳到当时被接受的空间和时间观念的框架中。他们引进了特设的假定，诸如物体在高速运动时缩短。物理学的整个框架变得既笨拙又丑陋。之后，爱因斯坦在1905年提出了一种更为迷人的观点，时间自身不能是完全独立的。相反地，它和空间结合成称为时空的四维的东西。爱因斯坦之所以得到这个思想，与其说是由于实验的结果，不如说是由于需要把理论的两个部分合并成一个协调的整体。这两个部分便是制约电磁场的，以及制约物体运动的两套定律。

我认为，无论是爱因斯坦还是别的什么人在1905年都没有意识到，相对性的这种新理论是多么简单而优雅。它完全变革了我们关于空间和时间的观念。这个例子很好地阐明了，在科学的哲学方面很难成为实在主义者，因为我们认为实在的是以我们所赞同的理论为前提。我能肯定，洛伦兹和费兹杰拉德在按照牛顿的绝对空间和绝对时间观念来解释光速实验时都自认为是实在主义者。这种时间和空间的概念似乎和常识以及实在相对应。然而，今天熟悉相对论的人，尽管人数极少，却持有不同的观点。我们必须不断告诉人们诸如空间和时间等基本概念的现代理解。

如果我们认为实在依我们的理论而定，怎么可以用它作为我们哲学的基础呢？在我认为存在一个有待人们去研究和理解的宇宙的意义上，我愿承认自己是个实在主义者。我把唯我主义者的立场认为是在浪费时间，他们认为任何事物都是我们想象的创造物。没人基于那个基础行事。但是没有理论我们关于宇宙就不能说什么是实在的。因此，我采取这样的被描述为头脑简单或天真的观点，即物理理论不过是我们用以描写观察结果的数学模型。如果该理论是优雅的模型，它能描写大量的观测，并能预言新观测的结果，则它就是一个好理论。除此以外，问它是否和实在相对应就没有任何意义，因为我们不知道什么与理论无关的实在。这种科学理论的观点可能使我成为一个工具主义者或实证主义者——正如我在上面提及的，我被同时加上这两个标签。称我为实证主义者的那位进一步说到，人所共知，实证主义已经过时了——这是用污蔑来证伪的又一例证。它在过去的知识界时兴过一阵，就这一点而言的确是过时了。但我所概括的实证主义似乎是人们为描写宇宙而寻找新定律新方法的仅有的可能的立场。因为我们没有和实在概念无关的模型，所以求助于实在将毫无用处。

依我的意见，对与模型无关的实在的隐含的信仰是科学哲学家们在对付量子力学和不确定原理时遭遇困难的基本原因。有一个称为薛定谔猫的著名理想实验。一只猫被置于一个密封的盒子中。有一杆枪瞄准着猫，如果一颗放射性核子衰变就开枪。发生此事的概率为50%。（今天没人敢提这样的动议，哪怕仅仅是一个理想实验，但是在薛定谔时代，人们没听说过什么动物解放之类的话。）

如果人们开启盒子，就会发现该猫非死即活。但是在此之前，猫的量子态应是死猫状态和活猫状态的混合。有些科学哲学家觉得这很难接受。猫不能一半被杀死另一半没被杀死，他们断言，正如没人处于半怀孕状态一样。使他们为难的原因在于，他们隐含地利用了实在的一个经典概念，一个对象只能有一个单独的确定历史。量子力学的全部要点是，它对实在有不同的观点。根据这种观点，一个对象不仅有单独的历史，而且有所有可能的历史。在大多数情形下，具有特定历史的概率会和具有稍微不同历史的概率相抵消；但是在一定情形下，邻近历史的概率会相互加强。我们正是从这些相互加强的历史中的一个观察到该对象的历史。

在薛定谔猫的情形，存在两种被加强的历史。猫在一种历史中被杀死，在另一种中存活。两种可能性可在量子理论中共存。因为有些哲学家隐含地假定猫只能有一个历史，所以他们就陷入这个死结而无法自拔。

时间的性质是我们物理理论确定我们实在概念的又一例子。不管发生了什么，时间总是勇往直前在过去被认为是显而易见的。但是相对论把时间和空间结合在一起，而且告知我们两者都能被宇宙中的物质和能量所卷曲或畸变。这样，我们对时间性质的认识就从与宇宙无关变成由宇宙赋予形态。这样，在某一点以前时间根本没有意义就变成可以理解的了；当人们往过去回溯，就会遭遇到一个不可逾越的障碍，即奇点，他不能超越奇点。如果情形果真如此，去询问何人或何物引起或创造大爆炸便毫无意义。谈论原因或创生即隐含地假设在大爆炸奇点之前存在时间。爱因斯坦的广义相对论预言，时间在150亿年前的奇点处必须有个开端，我们知道这一点已经25年了。但是哲学家们还没有掌握这个思想。他们仍然在为65年前发现的量子力学的基础忧虑。他们没有意识到物理学前沿已经前进了。

更糟糕的是虚时间的数学概念。詹姆·哈特尔和我提出，宇宙在虚时

间里既没有开端又没有终结。我因为谈论虚时间受到一位科学哲学家的猛烈攻击。他说：像虚时间这样的一种数学技巧和实在宇宙有什么相关呢？我以为，这位哲学家把专业数学术语中的实数和虚数与在日常语言中的实在和想象的用法混淆了。这刚好阐述了我的要点：如果某物与我们用以解释它的理论或模型无关，何以知道它是实在的？

我用了相对论和量子力学中的例子来显示，人们在试图赋予宇宙意义时所面临的问题。你是否理解相对论和量子力学，或者甚至这些理论是错误的，都无关紧要。我所希望显示的是，至少对于一名理论物理学家而言，把理论视作一种模型的某种实证主义的方法，是理解宇宙的仅有手段。我对我们找到描述宇宙中的万物的一套协调模型满怀信心。如果我们达到这个目标，那将是人类真正的胜利。

第7章　理论物理已经接近尾声了吗？[9]

我要在这几页讨论在不太远的将来，譬如20世纪末实现理论物理学目标的可能性。我这里是说，我们会拥有一套物理相互作用的完备的协调的统一理论，这一理论能描述所有可能的观测。当然，人们在做这类预言之时必须十分谨慎。以前我们至少有过两回以为自己濒于最后的综合。人们在本世纪初相信，任何东西都可以按照连续体力学来理解。所要做的一切只不过是测量一些诸如弹性、黏滞性和传导性等系数。原子结构和量子力学的发现粉碎了这一希望。又有一回，在20世纪20年代末，马克斯·玻恩对一群访问哥廷根的科学家说：“就我们所知，物理学将在6个月内完结。”这是在保罗·狄拉克发现狄拉克方程之后不久讲的。狄拉克是卢卡斯教席的一位前任。以他命名的方程制约电子的行为。人们预料类似的方程会制约质子，质子是另一种当时仅知的假设为基本的粒子。然而。中子和核力的发现又使那些希望落空。现在我们已经知道，事实上不管是质子还是中子都不是基本的，它们是由更小的粒子构成的。尽管如此，我们近年来取得了大量的进步，而且正如我将要描述的，存在某些谨慎乐观的根据，相信在阅读这篇文章的某些读者的有生之年，我们能看到一套完备的理论。即使我们的确得到了完备的统一理论，我们除了最简单的情形外，仍然不能作任何细节的预言。例如，我们已经知道制约我们日常经历的任何事物的物理定律。正如狄拉克指出的，他的方程是“大部分物理学以及全部化学的基础”。然而，我们只有对非常简单的系统，包括一颗质子和一颗电子的氢原子才能解这个方程。对于具有更多电子的更复杂的原子，且不说具有多于一个核的分子，我们就只能借助于近似法和直觉猜测，其有效性堪疑。对于由大约10^{23}颗粒子构成的宏观系统，我们必须使用统计方法而且抛弃获得方程准确解的任何幻想。我们虽然在原则上知道制约整个生物学的方程，但是不能把人类行为的研究归结为应用数学的一个分支。

我们说的物理学的一个完备的统一理论是什么含义呢？我们对物理实在的模拟的企图通常由两个部分组成：

1.一族各种物理量服从的局部定律。这些定律通常被表达成微分方程。

2.一系列边界条件。这些边界条件告诉我们宇宙某些区域在某一时刻的状态以及后来从宇宙的其他部分传递给它的什么效应。

许多人宣称，科学的角色是局限于这两个部分的第一个，也就是说一旦我们得到局部物理定律的完备集合，理论物理也就功德圆满了。他们把宇宙初始条件的问题归入形而上学或者宗教的范畴。这个看法在某种方面像20世纪以前劝阻科学研究的那些人的观点，他们说所有自然现象都是上帝的事务，所以不应加以探索。我认为，宇宙的初始条件和局部科学定律可以同样地作为科学研究和理论的课题。只有在我们比仅仅宣称“事情现在之所以这样是因为它过去是那样”更有作为时，我们才算有了一个完备的理论。

初始条件的唯一性问题和局部物理定律的任意性问题密不可分：如果一个理论包含有一些诸如质量或者耦合常数等人们可以随意赋值的可调节参数，则我们不把它当成是完整的。事实上，无论是初始条件还是理论中的参数值似乎都不是任意的，它们是被非常仔细地选取或者挑选出来的。例如，质子与中子质量差若不为两倍电子质量左右，人们就不能得到大约200种稳定的核，这些核构成元素，并且是化学和生物的基础。类似地，如果质子的引力质量非常不同，就不能得到这些核在其中合成的恒星。此外，如果宇宙的初始膨胀稍微再慢一些或稍微再快一些，则宇宙会在这种恒星演化之前就坍缩了，或者会膨胀得这么迅速，使得恒星永远不可能由引力凝聚而形成。

的确，有些人走得如此之远，他们甚至把对初始条件和参数的这些限制提高到原理的地位，这就是人存原理，可以表述为：“事物之所以如此是因为我们如此。”根据这一原理的一种版本，存在非常大量不同的分开的宇宙，它们具有不同的物理参数值和初始条件。这些宇宙中的大多数不能为智慧生命所需要的复杂结构发展提供恰当的条件。只有在少数具有和我们自己宇宙的类似的条件和参数的宇宙中，才可能让智慧生命得以发展并且询问：“宇宙为何像我们所观测的那样？”其答案当然是，如果宇宙换一种样子，就不存在任何人去问这个问题。

人存原理的确为许多令人注目的数值关系提供了某种解释，我们在不同的物理参数值之间可以观察到这些关系。然而，它不是完全令人满意的。人们不禁觉得应该存在某种更深刻的解释。此外，它不能解释宇宙中的所有区域。例如，我们太阳系肯定是我们存在的先决条件，先决条件还包括更早代的邻近恒星，重元素可由核聚变在这些恒星中形成。

甚至我们整个银河系也是必需的。但是似乎其他星系没有必要存在，更不用说在整个能观测到的宇宙中大体均匀分布的我们看得见的亿万个星系了。宇宙的大尺度均匀性令人难以信服，宇宙的大尺度结构竟取决于在一个寻常螺旋星系边缘环绕一颗普通恒星的一颗小小行星上微不足道的复杂分子结构。

如果我们不准备借助于人存原理，就需要某种统一理论来解释宇宙的初始条件和各种物理参数值。然而，要一蹴而就地杜撰出一种包罗万象的完整理论太困难了（但似乎不能阻止某些人这么做，我每周都从邮局收到两三种统一理论）。相反地，我们要做的是寻找部分理论，它能描述在忽视或以简单方式去近似某些相互作用下的情形。我们首先把宇宙的物质内容分成两个部分：“物质”即为诸如夸克、电子和μ介子等粒子，以及“相互作用”诸如引力和电磁力等。物质粒子由具有半自旋的场来描写，它服从泡利不相容原理，该原理保证同一状态下最多只能有一颗同类的粒子。这就是我们能有不坍缩成一点或辐射到无限远去的固体的原因。物质要素又分成两组：由夸克组成的强子，以及包括其余的轻子。

相互作用被唯象地分成四个范畴。它们按照强度依次为：强核力，这只是强子之间的相互作用；电磁力，它是在带电荷的强子和轻子之间的相互作用；弱核力，它是在所有强子和轻子之间的相互作用；最后还有迄今为止最弱的，即引力，它是在任何东西之间的相互作用。这些相互作用由整自旋的场表示，这些场不服从泡利不相容原理。这表明它们在同一态上可有许多粒子。在电磁力和引力的情形下，其相互作用还是长程的，这表明由大量物质粒子产生的场可以叠加起来，得到在宏观尺度上能被检测到的场。正因为这些原因，它们首先获得为之发展的理论：17世纪牛顿的引力论，以及19世纪麦克斯韦的电磁理论。因为牛顿理论在整个系统被赋予任何均匀的速度时保持不变，而麦克斯韦理论定义了一个优越的速度——光速，所以这两种理论在本质上是相互矛盾的。人们最后发现，牛顿引力论必须被修正，使之和麦克斯韦理论的不变性相协调。爱因斯坦在1915年提出的广义相对论达到了这种目的。

引力的广义相对论和电磁力的麦克斯韦理论是所谓的经典理论。经典理论牵涉到至少在原则上可以测量到任意精度的连续变化的量。然而，当人们想用这种理论去建立原子的模型时产生了一个问题。人们发现，原子是由一个很小的带正电荷的核以及围绕它的带负电荷的电子云

组成的。自然的假定是，电子绕着核公转，正如地球绕着太阳公转一样。但是经典理论预言，电子会辐射电磁波。这些波会携带走能量，并因此使电子以螺旋轨道撞到核上去，导致原子坍缩。

量子力学的发现克服了上述的困难。它的发现无疑是本世纪理论物理的最伟大的成就。其基本假设是海森伯的不确定性原理，它是讲某些物理量的对，譬如一颗粒子的位置和动量不能同时以无限的精度被测量。在原子的情形下，这表明处于最低能态的电子不能静止地待在核上。这是因为在这种情形下，其位置是精确定义的（在核上），而且它的速度也被精确地定义（为零）。相反地，不管是位置还是速度都必须围绕着核以某种概率分布抹平开来。因为电子在这种状态下没有更低能量的状态可供跃迁，所以它不能以电磁波的形式辐射出能量。

在20世纪的20年代和30年代，量子力学被极其成功地应用到诸如原子和分子的只具有有限自由度的系统中。但是，当人们尝试将它应用到电磁场时出现了困难，电磁场具有无限数目的自由度，粗略地讲，时空的每一点都具有两个自由度。这些自由度可被认为是一个谐振子，每个谐振子具有各自的位置和动量。因为谐振子不能有精确定义的位置和动量，所以不能处于静止状态。相反地，每个谐振子都具有所谓零点起伏和零点能的某种最小的量。所有这些无限数目的自由度的能量会使电子的表观质量和表观电荷变成无穷大。

在20世纪40年代晚期，人们发展了一种所谓的重正化步骤用来克服这个困难。其步骤是相当任意地扣除某个无限的量，使之留下有限的余量。在电磁场的情形，必须对电子的质量和电荷分别作这类无限扣除。这类重正化步骤在概念上或数学上从未有过坚实的基础，但是在实际中却相当成功。它最大的成功是预言了氢原子某些光谱线的一种微小位移，这被称为兰姆位移。然而，由于它对于被无限扣除后余下的有限的值从未做出过任何预言，所以从试图建立一个完备理论的观点看，它不是非常令人满意的。这样，我们就必须退回到人存原理去解释为何电子具有它所具有的质量和电荷。

在20世纪50年代和60年代，人们普遍相信，弱的和强的核力不是可重正化的，也就是说，它们需要进行无限数目的无限扣除才能使之有限。这样就遗留下无限个理论不能确定的有限余量。因为人们永远不能测量这所有无限个参量，所以这样的一种理论没有预言能力。然而，1971年杰拉德·特符夫特证明了电磁和弱相互作用的一个统一模型的确是

可重正化的，只要做有限个无限扣除。这个模型是早先由阿伯达斯·萨拉姆和史蒂芬·温伯格提出的。在萨拉姆—温伯格理论中，光子这个携带电磁相互作用的自旋为1的粒子和三种其他的自旋为1的称为W^+，W^-和Z^0的伙伴相联合。人们预言，所有这四种粒子在非常高的能量下的行为都非常相似。然而，在更低的能量下人们用所谓的自发对称破缺来解释如下事实，光子具有零静质量，而W^+，W^-和Z^0都具有大质量。该理论在低能下的预言和观测符合得十分好，这导致瑞典科学院在1979年把诺贝尔物理奖颁给萨拉姆、温伯格和谢尔登·格拉肖。格拉肖也建立了类似的理论。然而，因为我们还没有足够高能量的粒子加速器，它能在由光子携带的电磁力以及由W^+，W^-和Z^0携带的弱力真正发生相互统一的范畴内检验理论，所以正如格拉肖自己评论的，诺贝尔委员会这次实际上冒了相当大的风险。人们在几年之内就会拥有足够强大的加速器，而大多数物理学家坚信，他们会证实温伯格—萨拉姆理论[10]。

萨拉姆—温伯格理论的成功诱使人们寻求强作用的类似的可重正化理论。人们在相当早以前就意识到，质子和诸如π介子的其他强子不能是真正的基本粒子，它们必须是其他，叫作夸克的粒子的束缚态。这些粒子似乎具有古怪的性质，虽然它们能在一颗强子内相当自由地运动，人们却发现得不到单独夸克自身。它们不是以三个一组地出现（如质子和中子），就是以包括夸克和反夸克的对出现（如π介子）。为了解释这种现象，夸克被赋予一种称作色的特征。必须强调的是，这和我们通常的色感无关，夸克太微小了，不能用可见光看到，它仅是一个方便的名字。其思想是夸克带有三种色——红、绿和蓝——但是任何孤立的束缚态，譬如强子必须是无色的，要么像在质子中是红、绿和蓝的组合，要么像在π介子中是红和反红、绿和反绿以及蓝和反蓝的混合。

人们假定，夸克之间的强相互作用由称作胶子的自旋为1的粒子携带。胶子和携带弱相互作用的粒子相当相像。胶子也携带色，它们和夸克服从称作量子色动力学（简称为QCD）的可重正化理论。重正化步骤的一个结论是，该理论的有效耦合常数依所测量的能量而定，而且在非常高的能量下减少到零。这种现象被称作渐近自由。这表明强子中的夸克在高能碰撞时的行为几乎和自由粒子相似，这样它们的微扰可以用微扰理论成功地处理。微扰理论的预言在相当定性的水平上和观测一致，但是人们仍然不能宣称这个理论已被实验验证。有效耦合常数在低能下变成非常大，这时微扰理论失效。人们希望这种“红外束缚”能够解释为何夸克总被禁闭于无色的束缚态中，但是迄今为止没有人能真正信服地

展现这一点。

在分别得到强相互作用和弱电相互作用的可重正化理论之后，人们很自然要去寻求把两者结合起来的理论。这类理论被相当夸张地命名为“大统一理论”或简称为GUT。因为它们既非那么伟大，也没有完全统一，还由于它们具有一些诸如耦合常数和质量等不确定的重正化参数，因此也不是完整的，所以这种命名是相当误导的。尽管如此，它们也许是朝着完整统一理论的有意义的一步。它的基本思想是，虽然强相互作用的有效耦合常数在低能量下很大，但是由于渐近自由，它在高能量下逐渐减小。另一方面，虽然萨拉姆—温伯格理论的有效耦合常数在低能量下很小，但是由于该理论不是渐近自由的，它在高能量下逐渐增大。如果人们把在低能量下的耦合常数的增加率和减少率向高能量方向延伸的话，就会发现这两个耦合常数在大约10^{15}吉电子伏能量左右变成相等。（1吉电子伏即是10亿电子伏。这大约是1颗氢原子完全转变成能量时所释放出的能量。作为比较，在像燃烧这样的化学反应中释放出的能量只具有每原子1电子伏的数量级。）大统一理论提出，在比这个更高的能量下，强相互作用就和弱电相互作用相统一，但是在更低的能量下存在自发对称破缺。

10^{15}吉电子伏能量远远超过目前的任何实验装置的范围。当代的粒子加速器能产生大约10吉电子伏的质心能量，而下一代会产生100吉电子伏左右。这对于研究根据温伯格—萨拉姆理论电磁力应和弱力统一的能量范围将是足够的，但是它还远远低于实现弱电相互作用和强相互作用被预言的统一的能量。尽管如此，在实验室中仍能检验大统一理论的一些低能下的预言。例如，理论预言质子不应是完全稳定的，它必须以大约10^{31}年的寿命衰减。现在这个寿命的实验的低限为10^{30}年，这应该可以得到改善。

另一个可观测的预言是宇宙中的重子光子比率。物理定律似乎对粒子和反粒子一视同仁。更准确地讲，如果粒子用反粒子来替换，右手征用左手征来替换，以及所有粒子的速度都反向，则物理定律不变。这被称作CPT定理，并且它是在任何合理的理论中都应该成立的基本假设的一个推论。然而地球，其实整个太阳系都是由质子和中子构成，而没有任何反质子或者反中子。的确，这种粒子和反粒子间的不平衡正是我们存在的另一个先决条件。因为如果太阳系由等量的粒子和反粒子所构成，它们会相互湮灭殆尽，而只遗留下辐射。我们可以从从未观测到这

种湮灭辐射的证据得出结论，我们的星系完全是由粒子而不是由反粒子组成的。我们没有其他星系的直接证据，但是它们似乎很可能是由粒子构成的，而且在整个宇宙中存在粒子比反粒子的大约每10^8个光子一颗粒子的过量。人们可以采用人存原理对此进行解释，但是大统一理论实际上提供了一种可能的机制来解释这个不平衡。虽然所有相互作用似乎都在C（粒子用反粒子来取代），P（右手征改变成左手征）以及T（时间方向的反演）的联合作用下不变，人们已经知道，有些作用在T单独作用下不是不变。在早期宇宙，膨胀给出非常明显的时间箭头。这些相互作用产生的粒子就会比反粒子多。然而它们产生的数量太过依赖于模型，使得和观测的相符根本不能当作大统一理论的证实。

迄今为止的大部分努力是用于统一前三种物理相互作用，强核力、弱核力以及电磁力。第四种也就是最后一种的引力被忽略了。这么做的一个辩护理由是，引力是如此之微弱，以至于量子引力效应只有在粒子能量远远超过任何粒子加速器的能量下才会显著起来。另一种原因是，引力似乎是不可重正化的。人们为了得到有限的答案，就必须作无限个无限扣除，并相应地留下无限个不能确定的有限余量。然而，如果人们要得到完全统一的理论，就必须把引力包括进来。此外，广义相对论的经典理论预言，在时空中必须存在引力场在该处变成无限强大的奇性。这些奇性在过去发生在宇宙的现在膨胀的起点（大爆炸），在将来会发生在恒星甚至可能宇宙本身的引力坍缩之中。关于奇性的预言表明经典理论将会失效。然而，在引力场强到使量子引力效应变得重要以前，似乎没有理由认为它会失效。这样，为了描述早期宇宙并对初始条件给出有别于仅仅借助人存原理解释，量子引力论具有根本的重要性。

这样的一种理论对于回答如下问题也是不可或缺的：时间是否正如经典广义相对论所预言的那样，真的有起始而且可能有终结吗？抑或在大爆炸和大挤压处的奇性以某种方式被量子效应所抹平？当空间和时间结构本身必须服从不确定性原理时，这是个很难给出确切含义的问题。我个人的直觉是，奇性也许仍然存在，虽然人们在某种数学意义上可以把时间延拓并绕过这些奇点。然而，任何与意识或测量能力相关的主观时间概念都会到达终点。

获得量子引力论并和其他三类相互作用统一的前景如何呢？人们寄最大希望于把广义相对论推广到所谓的超引力。在这个框架中，携带引力相互作用的自旋为2的粒子，即引力子，可由所谓的超对称变换和其

他一些具有更低自旋的场相关联。这种理论具有一个伟大的功绩，即它抛弃由半整数自旋粒子代表的“物质”和由整数自旋粒子代表的“相互作用”之间的古老的二分法。它还具有的伟大优点是，量子理论中产生的许多无穷大会相互抵消。它们是否完全抵消而给出一种不用做任何无限扣除的有限理论尚在未定之天。人们希望事情果真如此。因为可以证明，包含引力的理论要么是有限的，要么是不可重正化的，也就是说，如果人们要做任何无限扣除，那么你就要做无限个无限扣除，并且留下无限个相应的不能确定的余量。这样，如果在超引力中所有的无穷大都被相互抵消掉，我们就得到一种理论，它不仅完全统一了所有的粒子和相互作用，而且在不具有任何不确定的重正化参数的意义上是完备的。

尽管我们还没有一种合适的量子引力论，且不说把它和其他相互作用统一起来的理论，但是我们的确知道这种理论应有的某些特征。其中之一和引力影响时空的因果结构的事实相关，也就是引力决定哪些事件可以是因果相关的。黑洞便是广义相对论的经典理论中的一个例子。黑洞是时空的一个区域，这个区域中的引力场是如此之强大，以至于任何光线或者其他信号都被拖回到这个区域，而不能逃逸到外部世界去。黑洞附近的强大的引力场引起粒子反粒子对的创生，粒子对中的一颗粒子落进黑洞，而另一颗逃逸到无限远。逃逸的粒子看起来就像是从该黑洞发射出来的。远离黑洞的观察者就只能测量到发射出来的粒子，而且由于他不能观察到落到黑洞中去的粒子，所以不能把这两者相关联。这表明逃逸的粒子具有超越通常和不确定性原理关联的额外的随机性和不可预见性。在正常情况下，不确定性原理的含义是，对于一颗粒子人们要么能明确预言其位置，要么能明确预言其速度，要么能明确预言其位置和速度的某种组合。这样，粗略地讲，人们做明确预言的能力被减半了。但是在从黑洞发射粒子的情形，就人们不能观察在黑洞中会发生什么而言，人们既不能明确预言发射粒子的位置，也不能明确预言其速度。人们所能给出的一切只是以一定模式发射粒子的概率。

因此，即便我们找到了一种统一理论，我们似乎也只能作统计的预言。我们还必须抛弃只存在我们所观察的唯一宇宙的观点。相反地，我们必须采纳这样的一幅图像，存在所有可能的宇宙的系综，这些宇宙具有某种概率分布。这也许可以解释为什么宇宙在大爆炸时以一种几乎完美的热平衡的状态开始。这是因为热平衡对应于最大数目的微观形态，因此具有最大的概率。我们可以修正伏尔泰笔下的哲学家潘格洛斯[11]的名言：“我们生活在所有可以允许的最有可能的世界中。”

我们在不太远的将来找到一种完备的统一理论的前景如何呢？在我们每一次把自己的观测推广到更小尺度和更高能量时，我们总是发现了新的结构层次。20世纪初，具有3×10^{-2}电子伏典型能量的粒子的布朗运动表明，物体不是连续的，而是由原子所组成的。之后不久，人们发现原先以为看不见的原子是由绕着一个核的电子所构成，其能量为几电子伏。人们接着发现核子是由所谓的基本粒子质子和中子组成，它们由数量级为10^6电子伏的核键捆绑在一起。这个故事的最新插曲是，我们发现质子和中子是由夸克所组成，它们由能量为数量级10^9电子伏的键捆绑在一起。现在我们需要极其庞大的机器并花费大量金钱去进行结果不能预言的实验，理论物理在这条路上已经走得如此之远，真是令人不胜感慨。

我们过去的经验暗示，在越来越高的能量下也许存在结构层次的无限序列。这种盒子套盒子的无限层次正是中国在“文化大革命”时期的正统说法。然而，引力似乎应提供一种极限，但那只是在10^{-33}厘米的非常短的距离尺度或者10^{28}电子伏的非常高的能量下。在比这更短的尺度下，人们预料时空行为不再像光滑的连续统那样，由于引力场的量子起伏，它会采取一种泡沫状的结构。

在我们现在大约为10^{10}电子伏的实验极限和10^{28}电子伏的引力截断之间还有一个广阔的待探索的区域。正如大统一理论那样，假设在这个巨大的区间只有一两个结构层次也许是天真的。然而，存在一些乐观的理由。至少在此刻情形似乎是，引力只能在某种超引力理论中可与其他的物理相互作用统一。这种理论只存在有限数目。尤其是存在一种最大的理论，即所谓的$N=8$的推广的超引力。它包括一种引力子，8种自旋为3/2的叫作引力微子的粒子，28种自旋为1的粒子，56种自旋为1/2的粒子，还有70种自旋为0的粒子。它们就是具有这么大的数目，还是不足以说明我们似乎在弱和强相互作用中观测到的所有粒子。例如，$N=8$的理论有28种自旋为1的粒子。这对于解释携带强相互作用的胶子以及携带弱相互作用的四种粒子中的两种已经足够，但是不能说明其余的两种。因此人们不得不相信，观测到的粒子中的许多或者大多数，例如胶子或者夸克，并不像它们此刻所显示的那样，不是真正基本的，它们是基本的$N=8$粒子的束缚态。如果我们基于目前的经济趋向作计划，在可见的将来甚或永远都不太可能拥有足够强大的加速器去检测这些复合结构。尽管如此，这些束缚态是从很好定义的$N=8$理论产生的事实，可让我们做一些预言，这些预言可以在现在或者最近的将来能够达到的能量

上得到验证。这种情形和温伯格—萨拉姆的弱电统一理论很类似。尽管我们还没有达到弱电统一应该发生的能量，但它的低能预言和观测符合得这么好，所以人们现在已经广泛地接受了它。

关于描述宇宙的理论必定有某些非常奇异的东西。为什么这种理论得以实现，而其他理论只能存在于其发明者的头脑之中呢？N＝8超引力理论确有一些非常独特之处。它似乎是满足以下条件的仅有的理论：

1.它在四维之中；

2.它把引力包括了进去；

3.它是有限的，不必进行任何无限扣除。

我已经指出过，如果我们要有一种没有参数的完备理论，第三种性质是不可缺少的。然而，不借助于人存原理就难以解释性质1和性质2。似乎存在满足性质1和性质3的，但是不包含引力的一种协调的理论。然而，在这样的一个宇宙中可能没有足够的吸引力使物质结成团，它对复杂结构的发展也许是必要的。时空为何是四维的通常被认为是物理学范畴之外的问题。然而人存原理也可以为此提供一个好的论证。三维的时空维数——我是说二维空间和一维时间——对于任何复杂有机体肯定是不够的。另一方面，如果空间维数超过三，围绕太阳公转的行星或者围绕原子核旋转的电子的轨道就变成不稳定，它们就会以螺旋的轨道向中心趋近。还存在时间维数比一更大的可能性，但是我本人发现这种宇宙难以想象。

迄今为止，我已隐含地假定存在一种终极理论，事情真的是这样的吗？至少存在三种可能性：

1.存在一种完备的统一理论。

2.不存在终极理论，但是存在理论的无限序列，只要采取这个理论之链的足够远的一环，就能对任何特定种类的观测作出预言。

3.不存在理论。超过某种程度之后，观测将不可描述或者预言，而只不过是任意的。

这第三种论断是作为和17、18世纪的科学家相对抗的观点提出的：他们怎么能提出定律来剥夺上帝改变主意的自由呢？尽管如此，他们这

么做了，并且没有惹到什么麻烦。因为量子力学本质上是关于我们不知道和不能预言的事物的理论，所以现在我们已经把可能性3合并到这个框架中，从而有效地消除它了。

可能性2归结为在越来越高能量下的结构的无限序列的图像。正如我早先说过的，这似乎是不太可能的，因为人们预料在10^{28}电子伏的普朗克能量处有一个截断。这样只给我们留下可能性1。在此刻N＝8超引力理论是在望的唯一候选者[12]。人们在几年之内可能会作一些关键的计算，其结果也许证明该理论不行。如果该理论经受了这些检验，似乎还需几年才能发展出计算方法使我们能做预言，才能解释宇宙的初始条件以及局部的科学定律。这些将是以后20多年内理论物理学家的突出的课题。但是在结束之前我愿提出一个小小的警告，也许给他们留下的时光比这个也多不了多少了。现在计算机是研究的好助手，但是它们必须服从人类的指挥。然而，如果人们夸大了它们当前的突飞猛进的速度，那么它们很可能会将理论物理完全取代。所以，如果不是理论物理已经接近尾声的话，便是理论物理学家的生涯快到尽头了。

第8章　爱因斯坦之梦[13]

20世纪初叶的两种新理论完全改变了我们有关空间和时间以及实在本身的思维方式。在超过75年后的今天，我们仍在探索它们的含义，试图把它们合并到描述宇宙万物的一种统一理论之中。这两种理论便是广义相对论和量子力学。广义相对论是处理空间和时间，以及它们在大尺度上如何被宇宙中的物质和能量弯曲或卷曲的问题。另一方面，量子力学处理非常小尺度的问题。其中包括了所谓的不确定性原理。该原理说，人们永远不可能同时准确地测量一颗粒子的位置和速度；你对其中一个量测量得越精密，则对另一个量测量得越不精密。永远存在一种不确定性或概率的因素，这就以一种根本的方式影响了物体在小尺度下的行为。爱因斯坦几乎是单独地创立了广义相对论，他在发展量子力学中起过重要的作用。他对后者的态度可以总结在“上帝不玩骰子”这句短语之中。但是所有证据表明，上帝是一位老赌徒，祂在每一种可能的场合掷骰子。

我将在这篇短文中阐述在这两种理论背后的基本思想，并说明爱因斯坦为什么这么不喜欢量子力学。我还将描述当人们试图把这两种理论合并时似乎要发生的显著的事物。这些表明时间本身在大约150亿年前有一个开端，而且它在将来的某点会到达终结。然而，在另一种时间里，宇宙没有边界。它既不被创生，也不被消灭。它就是存在。

让我从相对论开始。国家法律只在一个国家内有效，但是物理定律无论是在英国、美国或者日本都是同样的。它们在火星和仙女座星系上也是相同的。不仅如此，不管你以任何速度运动定律都是一样的。定律在子弹列车或者喷气式飞机上和对站立在某处的某人是一样的。当然，甚至在地球上处于静止的某人事实上也正以大约每秒18.6英里（30千米）的速度绕太阳公转。太阳又是以每秒几百千米的速度绕着银河系公转，等等。然而，所有这种运动都不影响科学定律；它们对于一切观测者都是相同的。

这个和系统速度的无关性是伽利略首次发现的。他发展了诸如炮弹或行星等物体的运动定律。然而，在人们想把这个观测者速度无关性推广到制约光运动的定律时就产生了一个问题。人们在18世纪发现光从光

源到观测者不是瞬息地传播的，它以大约为每秒186000英里（300000千米）的速度旅行。但是，这个速度是相对于什么而言的呢？似乎必须存在弥漫在整个空间的某种介质，光是通过这种介质旅行的。这种介质被称作以太。其思想是，光波以每秒186000英里的速度穿越以太旅行，这表明一位相对于以太静止的观测者会测量到大约每秒186000英里的光速，但是一位通过以太运动的观测者会测量到更高或更低的速度。尤其是人们相信，在地球绕太阳公转穿越以太时光速应当改变。然而，1887年迈克耳孙和莫雷进行的一次非常精细的实验指出，光速总是一样的。不管观测者以任何速度运动，他总是测量到每秒186000英里的光速。

这怎么可能是真的呢？以不同速度运动的观测者怎么会都测量到同样的速度呢？其答案是，如果我们通常的空间和时间的观念是对的，则他们不可能。然而，爱因斯坦在1905年写的一篇著名的论文中指出，如果观测者抛弃普适时间的观念，他们所有人就会测量到相同的光速。相反地，他们各自都有自己单独的时间，这些时间由各自携带的钟表来测量。如果他们相对运动得很慢，则由这些不同的钟表测量的时间几乎完全一致，但是如果这些钟表进行高速运动，则它们测量的时间就会有重大差别。比较地面的和商业航线上的钟表就实际上发现了这种效应，航线上的钟表比静止的钟表走得稍微慢一些。然而，对于正常的旅行速度，钟表速率的差别非常微小。你必须绕着地球飞4亿次，你的寿命才会被延长1秒钟；但是你的寿命却被所有那些航线的糟糕餐饮缩短得更多。

人们具有自己单独时间这一点，又何以使他们在以不同速度旅行时测量到同样的光速呢？光脉冲的速度是它在两个事件之间的距离除以事件之间的时间间隔。（这里事件的意义是在一个特定的时间在空间中单独的一点发生的某种事物。）以不同速度运动的人们在两个事件之间的距离上看法不会相同。例如，如果我测量在高速公路上奔驰的轿车，我会认为它仅仅移动了1千米，但对于在太阳上的某个人，由于当轿车在路上行走时地球移动了，所以他觉得轿车移动了1800千米。因为以不同速度运动的人测量到事件之间不同的距离，所以如果他们要在光速上相互一致，就必须也测量到不同的时间间隔。

爱因斯坦在1905所写的论文中提出的原始的相对论是我们现在称作狭义相对论的东西。它描述物体在空间和时间中如何运动。它显示出，时间不是和空间相分离的独自存在的普适的量。正如上下、左右和前后

一样，将来和过去不如说仅仅是在称作时空的某种东西中的方向。你只能朝时间将来的方向前进，但是你能沿着和它夹一个小角度的方向前进。这就是为什么时间能以不同的速率流逝。

狭义相对论把时间和空间合并到一起，但是空间和时间仍然是事件在其中发生的一个固定的背景。你能够选择通过时空运动的不同途径，但是对于修正时空背景却无能为力。然而，当爱因斯坦于1915年提出了广义相对论后这一切都改变了。他引进了一种革命性的观念，即引力不仅仅是在一个固定的时空背景里作用的力。相反地，引力是由在时空中物质和能量引起的时空畸变。譬如炮弹和行星等物体要沿着直线穿越时空，但是由于时空是弯曲的、卷曲的，而不是平坦的，所以它们的路径就显得被弯折了。地球要沿着直线穿越时空，但是由太阳质量产生的时空曲率使它必须沿着一个圆圈绕太阳公转。类似地，光要沿着直线旅行，但是太阳附近的时空曲率使得从遥远恒星来的光线在通过太阳附近时被弯折。在通常情况下，人们不能在天空中看到几乎和太阳同一方向的恒星。然而在日食时，太阳的大部分光线被月亮遮挡了，人们就能观测到从那些恒星来的光线。爱因斯坦是在第一次世界大战期间孕育了他的广义相对论，那时的条件不适合于作科学观测。但是战争一结束，一支英国的探险队观测了1919年的日食，并且证实了广义相对论的预言：时空不是平坦的，它被在其中的物质和能量所弯曲。

这是爱因斯坦的伟大胜利。他的发现完全变革了我们思考空间和时间的方式。它们不再是事件在其中发生的被动的背景。我们再也不能把空间和时间设想成永远前进，而不受在宇宙中发生事件影响的东西。相反地，它们现在成为动力学的量，它们和在其中发生的事件相互影响。

质量和能量的一个重要性质是它们总是正的。这就是引力总是把物体相互吸引到一起的原因。例如，地球的引力把我们吸引向它，即便我们处于世界相对的两边。这就是为什么在澳大利亚的人不会从世界上掉落出去的原因。类似地，太阳引力把行星维持在围绕它公转的轨道上并且阻止地球飞向黑暗的星际空间。按照广义相对论，质量总是正的这个事实意味着，时空正如地球的表面那样向自身弯折。如果质量为负的，时空就会像一个马鞍面那样以另外的方式弯折。这个时空的正曲率反映了引力是吸引的事实。爱因斯坦把它看作重大的问题。那时人们广泛地相信宇宙是静止的，然而如果空间特别是时间向它们自身弯折回去的话，宇宙怎么能以多多少少和现在同样的状态永远继续下去？

爱因斯坦原始的广义相对论方程预言，宇宙不是膨胀便是收缩。因此爱因斯坦在方程中加上额外的一项，这些方程把宇宙中的质量和能量与时空曲率相关联。这个所谓的宇宙项具有引力的排斥效应。这样就可以用宇宙项的排斥和物质的吸引相平衡。换言之，由宇宙项产生的负时空曲率能抵消由宇宙中质量和能量产生的正时空曲率。人们以这种方式可以得到一个以同样状态永远继续的宇宙模型。如果爱因斯坦坚持他原先没有宇宙项的方程，他就会做出宇宙不是在膨胀便是在收缩的预言。直到1929年埃德温·哈勃发现远处的星系在离开我们而去之前，没人想到宇宙是随时间变化的。宇宙正在膨胀。后来爱因斯坦把宇宙项称作“我一生中最大的错误”。

但是不管有没有宇宙项，物质使时空向它自身弯折的事实仍然是一个问题，尽管其严重性没有被广泛认识。这里指的是物质可能把它所在的区域弯曲得如此厉害，以至于事实上把自己从宇宙的其余部分分隔开来。这个区域会变成所谓的黑洞。物体可以落到黑洞中去，但是没有东西可以逃逸出来。要想逃逸出来就得比光跑得更快，而这是相对论所不允许的，这样，黑洞中的物质就被俘获住，并且坍缩成某种具有非常高密度的未知状态。

爱因斯坦被这种坍缩的含义而深深困扰，并且拒绝相信这会发生。但是罗伯特·奥本海默在1939年指出，一颗具有大于太阳质量两倍的晚年恒星在耗尽其所有的燃料时会不可避免地坍缩。然后奥本海默受战争干扰，卷入到原子弹计划中，而失去对引力坍缩的兴趣。其他科学家更关心那种能在地球上研究的物理。关于宇宙远处的预言似乎不能由观测来检验，所以他们不信任。然而在20世纪60年代，天文观测无论在范围上还是在质量上都有了巨大的改善，使人们对引力坍缩和早期宇宙产生新的兴趣。直到罗杰·彭罗斯和我证明了若干定理之后，爱因斯坦广义相对论在这种情形下所预言的才清楚地呈现出来。这些定理指出，时空向它自身弯曲的事实表明，必须存在奇性，也就是时空具有一个开端或者终结的地方。它在大约150亿年前的大爆炸处有一个开端，而且，坍缩的恒星以及任何落入坍缩恒星留下的黑洞中的东西，将到达一个终点。

爱因斯坦广义相对论预言奇性的事实引起物理学的一场危机。把时空曲率和质量能量分布相关联的广义相对论方程在奇性处不能被定义。这表明广义相对论不能预言从奇性会冒出什么东西来。尤其是，广义相对论不能预言宇宙在大爆炸处应如何起始。这样，广义相对论不是一个

完整的理论。为了确定宇宙应如何起始以及物体在自身引力下坍缩时会发生什么，需要一个附加的要素。

量子力学看来是这个必须附加的要素。1905年，也正是爱因斯坦撰写他有关狭义相对论论文的同一年，他还写了一篇有关被称为光电效应现象的论文。人们观测到当光射到某些金属上时会释放出带电粒子。使人迷惑的是，如果减小光的强度，发射粒子数随之减少，但是每个发射粒子的速度保持不变。爱因斯坦指出，如果光不像大家所假想的那样以连续变化的量，而是以具有确定大小的波包入射，则可以解释这种现象。光只能采取称为量子的波包形式的思想是由德国物理学家马克斯·普朗克在几年前提出的。它有点像人们不能在超级市场买到散装糖，只能买到一千克装的糖似的。普朗克使用量子的观念解释红热的金属块为什么不发出无限的热量。但是，他把量子简单地考虑成一种理论技巧，它不对应于物理实在中的任何东西。爱因斯坦的论文指出，你可以观察到单个的量子。每一颗发射出的粒子都对应于一颗打到金属上的光量子。这被广泛地认为是对量子理论的一个重要贡献，他因此而获得1922年的诺贝尔奖。（他应该因广义相对论而得奖，可惜空间和时间是弯曲的思想仍然被认为有太多的猜测和争议，所以他们因光电效应而颁奖给他，这并不是说，它本身不值得得奖。）

直到1925年，在威纳·海森伯指出光电效应导致精确测量一颗粒子的位置不可能后，它的含义才被充分认识到。为了看粒子的位置，你必须把光投射到上面。但是爱因斯坦指出，你不能使用非常少量的光；你至少要使用一个波包或量子。这个光的波包会扰动粒子并使它在某一方向以某一速度运动。你想把粒子的位置测量得越精确，你就要用越大能量的波包并且因此更厉害地扰动该粒子。不管你怎么测量粒子，其位置上的不确定性乘上其速度上的不确定性总是大于某个最小量。

这个海森伯的不确定性原理显示，人们不能精确地测量系统的态，所以就不能精确预言它将来的行为。人们所能做的一切是预言不同结果的概率。正是这种概率或随机因素使爱因斯坦大为困惑。他拒绝相信物理定律不应该对将来要发生的作出确定的、毫不含糊的预言。但是不管人们是否喜欢，所有证据表明，量子现象和不确定性原理是不可避免的，而且在物理学的所有分支中发生。

爱因斯坦的广义相对论是所谓的经典理论，也就是说，它不包含不确定性原理。所以人们必须寻求一种把广义相对论和不确定性原理结合

在一起的新理论。这种新理论和经典广义相对论的差异在大多数情形下是非常微小的。正如早先提到的，这是因为量子效应预言的不确定性只是在非常小的尺度下，而广义相对论处理时空的大尺度结构。然而，罗杰·彭罗斯和我证明的奇性定理显示，时空在非常小的尺度下会变成高度弯曲的。不确定性原理的效应那时就会变得非常重要，而且似乎导致某些令人注目的结果。

爱因斯坦对量子力学和不确定性原理心存疑问的部分原因是由下面的事实引起的：他习惯于系统具有确定历史的通常概念。一颗粒子不是处于此处便是处于他处。它不可能一半处于此处另一半处于他处。类似地，诸如航天员登上月球的事件要么发生了要么没有发生。它有点和你不能稍微死了或者稍微怀孕的事实相似。你要么是，要么不是。但是，如果一个系统具有单个确定的历史，则不确定性原理就导致各种悖论，譬如粒子同时在两处或者航天员只有一半在月亮上。

美国物理学家里查德·费恩曼提出了一种优雅的方法，从而避免了这些深深困扰爱因斯坦的悖论。费恩曼由于1948年的光的量子理论的研究而举世闻名。1965年他和另一位美国人朱里安·施温格以及日本物理学家朝永振一郎共获诺贝尔奖。但是，他和爱因斯坦一脉相承，是物理学家之物理学家。他讨厌繁文缛节。因为他觉得美国国家科学院花费大部分时间来决定其他科学家中何人应当选为院士，所以他就辞去院士位置。费恩曼死于1988年，他由于对理论物理的多方面贡献而英名长存。他的贡献之一即是以他命名的图，这几乎是粒子物理中任何计算的基础。但他更重要的贡献是对历史求和的概念。其思想是，一个系统在时空中不止有单个的历史，不像人们在经典非量子理论中通常假定的那样。相反地，它具有所有可能的历史。例如，考虑在某一时刻处于A点的一颗粒子。正常情形下，人们会假定该粒子从A点沿着一根直线离开。然而，按照对历史求和，它能沿着从A出发的任何路径运动。它有点像你在一张吸水纸上滴一滴墨水所要发生的那样。墨水粒子会沿着所有可能的路径在吸水纸上弥散开来。甚至在你为了阻断两点之间的直线而把纸切开一个缝隙时，墨水也会绕过切口的角落。

粒子的每一个路径或者历史都有一个依赖其形状的数与之相关。粒子从A走到B的概率可由将和所有从A到B粒子的路径相关的数叠加起来而得到。对于大多数路径，和邻近路径相关的数几乎被相互抵消。这样，它们对粒子从A走到B的概率的贡献很小。但是，直线路径的数将和

几乎直线的路径的数相加。这样，对概率的主要贡献来自于直线或几乎直线的路径。这就是为什么粒子在通过气泡室时的轨迹看起来几乎是笔直的。但是如果你把某种像是带有一个缝隙的一堵墙的东西放在粒子的路途中，粒子的路径就会弥散到缝隙之外。在通过缝隙的直线之外找到粒子的概率可以很高。

1973年我开始研究不确定性原理对处在黑洞附近弯曲时空的粒子的效应。引人注目的是，我发现黑洞不是完全黑的。不确定性原理允许粒子和辐射以稳定的速率从黑洞漏出来。这个结果使我以及所有其他人都大吃一惊，一般人都不相信它。但是现在回想起来，这应该是显而易见的。黑洞是空间的一个区域，如果人们以低于光速的速度旅行就不可能从这个区域逃逸。但是费恩曼的对历史求和说，粒子可以采取时空中的任何路径。这样，粒子就可能旅行得比光还快。粒子以比光速更快的速度做长距离运动的概率很低，但是它可以以超光速在刚好够逃逸出黑洞的距离上运动，然后再以慢于光速的速度运动。不确定性原理以这种方式允许粒子从过去被认为是终极牢狱的黑洞中逃逸出来。对于一颗太阳质量的黑洞，因为粒子必须超光速运动几千米，所以它逃逸的概率非常低。但是可能存在在早期宇宙形成的小得多的黑洞。这些太初黑洞的尺度可以比原子核还小，而它们可有10亿吨的质量，也就是富士山那么大的质量。它们能发射出像一座大型电厂那么大的能量。如果我们能找到一个这样的小黑洞中并能驾驭其能量该有多好！可惜的是，在宇宙四周似乎没有很多这样的黑洞。

黑洞辐射的预言是把爱因斯坦广义相对论和量子原理结合的第一个非平凡的结果。它显示引力坍缩并不像过去以为的那样是死亡的结局。黑洞中粒子的历史不必在一个奇点处终结。相反地，它们可以从黑洞中逃逸出来，并且在外面继续它们的历史。量子原理也许表明，人们还可以避免在时间中有一个开端，也就是在大爆炸处的创生的一点的历史。

这是个更困难得多的问题。因为它牵涉到不仅把量子原理应用到给定时空背景中的粒子路径，而且应用到时间和空间的结构本身。人们需要做的是一种不仅对粒子的而且也对空间和时间的整个结构的历史求和的方法。我们还不知道如何恰当地进行这种求和，但是我们知道它应具有的某些特征。其中之一便是，如果人们处理在所谓的虚时间里，而不是在通常的实时间里的历史，那么求和就更容易些。虚时间是一个很难掌握的概念，它可能是我的书的读者觉得最困难的东西。我还由于使用

虚时间而受到哲学家们猛烈的批评。虚时间和实在的宇宙怎么会相干呢？我以为这些哲学家没有从历史吸取教训。人们曾经一度认为地球是平坦的以及太阳绕着地球转动都是显而易见的，然而从哥白尼和伽利略时代开始，我们就得调整适应这种观念，即地球是球形的而且它绕太阳公转。类似地，长期以来时间对于每位观测者以相同速率流逝似乎是显而易见的，但是从爱因斯坦时代开始，我们就得接受，对于不同的观测者时间流逝的速率不同。此外，宇宙具有唯一的历史似乎是显然的，但是从发现量子力学起，我们就必须把宇宙考虑成具有任何可能的历史。我要提出，虚时间的观念也将是我们必须接受的某种东西。它和相信世界是球形的是同等程度的一个智慧的飞跃。在有教养的世界中平坦地球的信仰者已是寥寥无几。

你可以把通常的实的时间当成一根从左至右的水平线。左边代表早先，右边代表以后。但是你还可以考虑时间的另一个方向，也就是书页的上方和下方。这就是时间的所谓的虚的方向，它和实时间成直角。

引入虚时间的缘由是什么呢？人们为什么不只拘泥于我们理解的通常的实时间呢？正如早先所提到的，其原因是物质和能量要使时空向其自身弯曲。在实时间方向，这就不可避免地导致奇性，时空在这里到达尽头。物理学方程在奇点处无法定义，这样人们就不能预言会发生什么。但是虚时间方向和实时间成直角。这表明它的行为和在空间中运动的三个方向相类似。宇宙中物质引起的时空曲率就使三个空间方向和这个虚的时间方向绕到后面再相遇到一起。它们会形成一个闭合的表面，正如地球的表面那样。这三个空间方向和虚时间会形成一个自身闭合的时空，没有边界或者边缘。它没有任何可以叫作开端或者终结的点，正和地球的表面没有开端或者终结一样。

1983年詹姆·哈特尔和我提出，对于宇宙不能取在实时间中的历史的求和，相反地，它应当取在虚时间内的历史的求和，而且这些历史，正如地球的表面那样，自身必须是闭合的。因为这些历史不具有任何奇性或者任何开端或终结，在它们中会发生什么可完全由物理定律所确定。这表明在虚时间中发生的东西可被计算出来。而如果你知道宇宙在虚时间里的历史，你就能计算出它在实时间里如何行为。用这种方法，你可望得到一个完备的统一理论，它能预言宇宙中的一切。爱因斯坦把他的晚年献身于寻求这样的一种理论。因为他不相信量子力学，所以他没有寻找到。他不准备承认宇宙可以有许多不同的历史，正如在对历史求和

中的那样。对于宇宙我们仍然不知道如何正确地对历史求和，但是我们能够相当肯定，它将牵涉到虚时间以及时空向自身闭合的思想。我认为，对于下一代人而言，这些思想将会像世界是球形的那么自然。虚时间已经成为科学幻想的老生常谈。但是它不仅是科学幻想或者数学技巧，它是某种使我们生活于其中的宇宙成形的某种东西。

第9章　宇宙的起源[14]

宇宙起源的问题有点像那个古老的问题：是先有鸡呢，还是先有蛋？换句话说，就是何物创生宇宙，又是何物创生该物呢？也许宇宙，或者创生它的东西永远存在，并不需要被创生。直到不久之前，科学家们还一直试图回避这样的问题，觉得它们与其说是属于科学，不如说是属于形而上学或宗教。然而，人们在过去几年发现，科学定律甚至在宇宙的开端也是成立的。在那种情形下，宇宙可以是自足的，并由科学定律所完全确定。

关于宇宙是否并如何起始的争论贯穿了整个有记载的历史。基本上存在两个思想学派。许多早期的传统，以及犹太教、基督教和伊斯兰教认为宇宙是在相当近的过去创生的。（17世纪时邬谢尔主教算出宇宙诞生的日期是公元前4004年，这个数目是由把在旧约圣经中人物的年龄加起来而得到的。）用以支持这个近世起源观点的事实，是人们认识到人类一直在文化和技术中进步。我们都记得那种业绩的首创者或者这种技术的发展者。于是，如此论证，即说明我们不可能存在了那么久；否则，我们应比目前更加先进。事实上，《圣经》的创世日期和上次冰河期的结束相差不多，而这似乎正是现代人类首次出现的时候。

另一方面，还有诸如希腊哲学家亚里士多德的一些人，他们不喜欢宇宙有个开端的思想。他们觉得这意味着神意的干涉。他们宁愿相信宇宙已经存在了并将继续存在无限久。不朽的东西比必须被创生的东西更加完美。他们对上述有关人类进步的诘难的回答是：周期性洪水或者其他自然灾难重复地使人类回到起始状态。

两种学派都认为，宇宙在根本上不随时间改变。它要么以现在形式创生，要么以今天的样子维持了无限久。这是一种自然的信念，由于人类生命——实际上整个有记载的历史——是如此之短暂，宇宙在此期间从未显著地改变过。在一个稳定不变的宇宙框架中，它是已经存在了无限久还是在有限的过去诞生，实在是一个形而上学或宗教的问题，任何一种理论都能对此作解释。1781年哲学家伊曼努尔·康德写了一部里程碑式的、非常模糊的著作《纯粹理性批判》。他在这部著作中得出结论，存在同样有效的论证证明宇宙有开端和宇宙没有开端的信念。正如他的

书名所提示的，他是单纯地基于理性得出的结论；换句话说，就是根本不管宇宙的观测。毕竟也是，在一个不变的宇宙中，有什么可观测的呢？

然而在19世纪，证据开始逐渐积累起来，它表明地球以及宇宙的其他部分事实上是随时间而变化的。地质学家们意识到岩石以及其中的化石的形成需要几亿甚至几十亿年的时间。这比创生论者计算的地球年龄长得太多了。由德国物理学家路德维希·玻尔兹曼提出的所谓热力学第二定律还提供了进一步的证据，宇宙中的无序度的总量（它是由称为熵的量所测量的）总是随时间而增加。正如有关人类进步的论证，这暗示宇宙只能运行了有限的时间。否则的话，它现在应已退化到一种完全无序的状态，万物都处于相同的温度。

静态宇宙思想所遭遇的另一个困难是，根据牛顿的引力定律，宇宙中的每一颗恒星必须被其他每一颗恒星吸引。如果是这样的话，它们怎么能维持相互间的恒定距离，并且静止地停在那里呢？难道它们不落到一起吗？

牛顿晓得这个问题。在一封致当时一位主要哲学家里查德·本特里的信中，他同意这样的观点，即有限的一群恒星不可能静止不动，它们全部会落到某个中心点。然而，他论断道，一个无限的恒星集合不会落到一起，由于不存在任何可供它们落去的中心点。这种论证是人们在谈论无限系统时会遭遇的陷阱的一个例子。用不同的方法将从宇宙的其余的无限数目的恒星作用到每颗恒星的力加起来，会对恒星间是否维持恒常距离给出不同的答案。我们现在知道，正确的步骤是考虑恒星的有限区域，然后加上在该区域之外大致均匀分布的更多恒星。有限恒星的集合会落到一起，而按照牛顿定律，加上区域外更多的恒星不能阻止其坍缩。这样，一个恒星的无限集合不能处于静止不动的状态。如果它们在某一时刻不在做相对运动，它们之间的吸引力会使它们开始朝相互方向落去。另一种情形是，它们可能正在相互离开，而引力使这种退行速度降低。

尽管恒定不变的宇宙的观念具有这些困难，17、18、19甚至20世纪初期都没有人提出过，宇宙也许是随时间演化的，不管是牛顿还是爱因斯坦都失去了预言宇宙不是在收缩便是在膨胀的机会。因为牛顿生活在观测发现宇宙膨胀以前的250年，所以人们实在不能责备他。但是爱因斯坦应该知道得更好。他在1915年提出的广义相对论预言宇宙正在膨

胀。但是他对稳恒宇宙是如此之执迷不悟，以至于要在理论中加上一个使之和牛顿理论相调和并用于抗衡引力的因素。

1929年埃德温·哈勃的宇宙膨胀的发现完全改观了宇宙起源的讨论。如果你把星系现在的运动往时间的过去方向倒推，它们在100亿和200亿年前之间的某一时刻似乎应该重叠在一起，在这个称为大爆炸奇点的时刻，宇宙的密度和时空的曲率应为无穷大。所有已知的科学定律在这种条件下都失效了。这对科学是一桩灾难。科学所能告诉我们的只是：宇宙现状之所以这样是因为它过去是那样。但是科学不能解释为何它在大爆炸后的那一瞬间是那个样子的。

这样，许多科学家对此结论感到不悦就毫不奇怪了。为了避免存在大爆炸奇点以及由此引起的时间具有开端的结论，人们进行了若干尝试。其中一种称为稳恒态理论。它的思想是，随着星系互相分离而去，由连续产生的物质在星系之间的空间中形成新的星系。这样宇宙就多多少少以今日这样的状态不但已经存在了，而且还将继续存在无限长时间。

为了使宇宙继续膨胀并创生新物质，稳恒态模型需要修改广义相对论。但是所需要的产生率非常低：大约为每年每立方千米一个粒子，这不会和观测相冲突。该理论还预言了，星系和类似物体的平均密度不但在空间上而且在时间上必须是常数。然而，由马丁·赖尔和他的剑桥小组进行的银河系外射电源的普查显示，弱源的数目比强源的数目多得多。人们可以预料，弱的源在平均上讲应是较遥远的。这样就存在两种可能性：或许我们正位于宇宙中的一个强源不如平均源频繁的区域；或者过去的源的密度更高，光线在离开这些源向我们传播时旅行了更遥远的距离。这两种可能性都无法和稳恒态理论相协调，因为该理论预言射电源密度不仅在空间上而且在时间上必须为常数。1964年阿诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊发现了比我们的银河系遥远得多的地方起源的微波辐射背景，这是对该理论的致命打击。它具有从一个热体发射出的辐射的特征谱，尽管在这种情形下热这个字根本不适合，因为其温度只不过比绝对零度高2.7开而已。宇宙是一个既寒冷又黑暗的地方！稳恒态理论中没有一种产生具有这种谱的微波的合理机制，所以稳恒态理论难逃被抛弃的命运。

1963年两位苏联科学家欧格尼·利弗席兹和艾萨克·哈拉尼科夫提出另一种思想，企图用来避免大爆炸奇性。他们说，只有当星系直接相互

接近或离开时，它们才会在过去的一个单独的点上相重叠，才导致无限密度状态。可惜的是，星系还多少具有一些侧向速度，宇宙早期就可能存在过这样的一种收缩相，这时，星系虽然曾经非常靠近过，却能设法避免互相撞击。然后宇宙会继续重新膨胀，而不必通过一种无限密度的状态。

当利弗席兹和哈拉尼科夫提出其设想时，我正是一名研究生，亟须一个问题以完成博士论文。因为是否有过大爆炸奇点的问题对于理解宇宙的起源关系重大，所以它引起了我的兴趣。我和罗杰.彭罗斯一道发展了一套数学工具，用以处理这个以及类似的问题。我们指出，如果广义相对论是正确的，任何合理的宇宙模型都必须起始于一个奇点。这就表明，科学能够预言，宇宙必须有一个开端，但是它不能够预言宇宙应如何起始：正因为如此，人们必须求助于上帝。

审查人们对奇性看法的变化是十分有趣的。当我还是一名研究生时，几乎没人认真地看待它。现在，作为奇性定理的一个结果，几乎无人不信宇宙始于一个奇点，物理定律在那一点失效。然而，现在我认为，虽然存在奇点，物理定律仍能确定宇宙是如何起始的。

广义相对论是一种所谓的经典理论。就是说，它没有顾及这个事实：即粒子不具备精确确定的位置和速度，而是被量子力学的不确定性原理“抹平”在一个小范围内。不确定性原理不允许我们同时既测量位置又测量速度。因为在正常情形下时空的曲率在和粒子位置的不确定性相比较时非常大，这些对我们没什么影响。然而奇性定理指出，在现在的宇宙膨胀相的开端，时空被高度地畸变，并且具有很小的曲率半径。不确定性原理在这种情形下变成非常重要。这样，广义相对论因预言奇性而导致自身的垮台。为了讨论宇宙的开端，我们需要一种结合广义相对论和量子力学的理论。

那种理论便是量子引力论。我们尚未知道正确的量子引力论应采取的准确形式。我们此刻所拥有的最佳候选者是超弦理论，但它仍有许多未解决的困难。然而，人们可以期望，任何有前途的理论都应具有的某些特征。其中之一便是爱因斯坦的思想，引力效应由在其中的物质和能量弯曲甚至卷曲的时空来体现。物体在弯曲空间中沿着最接近于直线的轨迹运行。然而，由于时空是弯曲的，所以它们的路径就显得是弯折的，仿佛被引力场弯折了似的。

另一种在这个终极理论中可以预料的要素是里查德·费恩曼的设想，即量子理论可以表达成“对历史的求和”。该思想可以用最简单的形式表达成，每颗粒子在时间中走过任何可能的路径或历史。每一路径或历史具有依其形状而定的概率。为了使这种思想可行，人们必须考虑在虚时间里发生的历史，而不是在我们感觉生活于其中的实时间里发生的历史。虚时间听起来有点像是科学幻想的东西，其实它是定义得很好的数学概念。它在某种意义上可被认为是和实时间成直角的时间方向。人们把所有具有某种性质的粒子历史，譬如在某些时刻通过某些点的历史的概率加起来。然后应把这结果延拓到我们在其中生活的实的时空中去。这不是量子力学的最熟知的手段，但它给出和其他方法得到的相同结果。

在量子引力的情形下，费恩曼的对历史求和的思想牵涉到对宇宙的不同的可能的历史，也就是对不同的弯曲时空的求和。这些代表了宇宙和其中的任何东西的历史。人们必须指明，在对历史的求和中，应包括哪些种类的弯曲空间。这种空间种类的选取确定了宇宙处于什么状态。如果定义宇宙状态的弯曲空间种类包括具有奇性的空间，则该理论就不能确定这类空间的概率。相反地，它们必须以某种任意的方法被赋予概率。这意味着科学不能预言时空的这类奇性历史的概率。这样，它就不能预言宇宙应如何运行。然而，宇宙可能处于由只包括非奇性弯曲空间的求和所定义的状态。在这种情形下，科学定律就把宇宙完全确定，人们就不必吁求宇宙之外的某物来确定宇宙如何起始。由只对非奇性历史的求和确定宇宙的状态有点像一名醉汉在灯柱之下找他的钥匙：这里也许不是他遗失之处，但是此处是他可能找到的仅有的地方。类似地，宇宙也许不处于由对非奇性历史求和定义的状态，但只有在这种状态下，科学才能预言宇宙应当是什么样子的。

1983年詹姆·哈特尔和我提出，宇宙的状态应由对一定种类历史的求和给出。这类历史由没有奇性的，而且具有有限尺度却没有边界或边缘的弯曲空间组成。它们像是地球的表面，只不过多了两维。地球的表面具有有限的面积，但是它不具有任何奇性、边界或边缘。我曾经用实验验证过这一点。我作过环球旅行，而没有落到外面去。

哈特尔和我所做的设想可被重述成：宇宙的边界条件是它没有边界。只有当宇宙处于这个无边界状态时，科学定律自身才能确定每种可能历史的概率。因此，只有在这种情形下，已知的定律才会确定宇宙应

如何运行。如果宇宙处于任何其他的状态，则历史求和中的弯曲空间的种类就要包括具有奇性的空间。人们必须求助于已知科学定律以外的某种原理，才能确定这种奇性历史的概率。这种原理就会是外在于我们宇宙的某种东西。我们不能从我们宇宙之中将其推导出来。而另一方面，如果宇宙是处于无边界状态，在原则上，我们就能在不确定性原理容忍的限制之内完全确定宇宙应如何运行。

如果宇宙处于无边界状态，那对于科学而言就太好了，但是我们如何才能知道事情究竟是否如此呢？其答案是，无边界设想对宇宙应如何运行作出了明确的预言。如果这些预言不与观测相符合，则我们就能得出结论说，宇宙不处于无边界状态。这样，在哲学家卡尔·波普定义的意义上说，无边界设想是一种好的科学理论：它可被观测证伪。

如果观测与预言不相符合，我们就知道在可能历史的种类中必须有奇性。然而，这大致就是我们可以知道的一切。我们不能计算出这种奇性历史的概率，因此我们不能预言宇宙应如何运行，有人也许会认为，如果不可预见性只发生在大爆炸处，那不会太碍事，那毕竟是100亿或200亿年以前的事。但是，如果可预言性在大爆炸的非常强引力场中失效，那么只要恒星坍缩它也会失效。这种事件仅在我们的银河系中每周就会发生几次。我们的预言能力甚至按照天气预报的标准来说也是非常差劲的。

当然，人们还会说，我们根本不必在乎发生在一颗遥远恒星处的可预言性的失效。然而，在量子理论中任何不被实际上禁止的东西都能够并将要发生。这样，如果可能历史的种类中包括奇性空间的话，这些奇性可在任何地方发生，而不仅在大爆炸处以及坍缩星之中。这意味着，我们不能预言任何东西。反过来说，我们能够预言事件的这一事实是反对奇性并赞同无边界设想的实验证据。

那么无边界设想为宇宙做出什么预言呢？第一个预言是，因为宇宙的所有可能的历史在广延上都是有限的，所以人们用来作为时间测度的任何量都必须有一个最大值和一个最小值。这样宇宙就有一个开端和一个终结。在实时间中的开端即是大爆炸奇点。然而，在虚时间中这个开端就不再是奇点。相反地，它有点像地球的北极。如果人们把地球表面的纬度当作时间的类似物，则可以说地球的表面从北极开始。然而，北极是地球上完全普通的一点。它没有任何特殊之处，同样的定律在北极正如同在地球上的其他地方一样成立。类似地，我们用来标志作“在虚时

间内宇宙的起始”的事件是时空中的一个通常的点，正如其他的点那样。科学定律在开端处正如在其他地方一样成立。

人们从和地球表面的类比，也许会预料到，正如北极和南极相似一样，宇宙的终结会和开端相类似。然而，南北两极是对应于虚时间中的宇宙历史的开端和终结。如果人们把对历史求和的结果从虚时间向实时间延拓，就会发现宇宙在实时间中的开端和它的终结可以非常不同。

约纳逊·哈里威尔和我对无边界条件的含义作过一个近似计算。我们把宇宙当作一个完全光滑和均匀的背景来处理，在这个背景上存在密度的小微扰。宇宙在实时间中从非常小的半径开始膨胀。最初的这种膨胀被称作暴胀：也就是说，宇宙尺度在比一秒还要短暂非常多的每一时间间隔中得到加倍，这正如在某些国家中每年物价都要加倍一样。第一次世界大战后的德国也许创下了通货膨胀的世界纪录，一捆面包的价格在几个月的时间内从少于1个马克涨到100万马克。但是没有任何东西可与似乎在极早期宇宙发生过的暴胀相比拟：宇宙尺度在一秒的极微小的部分时间内至少增加了100万亿亿亿倍。这当然是发生在当局政府之前的事。

暴胀在如下意义上来说，是件好事，它产生了一个在大尺度上光滑而均匀的宇宙，而且这个宇宙以刚好避免坍缩的临界速度膨胀。它还能在相当严格的意义上把宇宙的所有内容从无中创生出来，这是暴胀的又一好处。当宇宙像北极那样的一个单独点时，它不包含任何东西。然而，在我们可观测的宇宙部分至少有10^{80}颗粒子。所有这些粒子从何而来呢？其答案是，相对论和量子力学允许物质从能量中以粒子反粒子对的形式创生出来。那么能量又是从何而来以创生物质呢？其答案是，它是从宇宙的引力能中借来的。宇宙亏欠了极大数量的负引力能的债务，它刚好和物质的正能量相平衡。在暴胀时期宇宙从引力能借了巨债，用以负担更多物质的创生。其结果便是凯恩斯经济学的胜利：一个充满物质的、充满活力的、正在膨胀的宇宙。引力能的债务只有在宇宙终结时才能偿付清。

早期宇宙不能是完全均匀一致的，否则的话就会违反量子力学的不确定性原理。相反地，必须存在对均匀密度的一些偏差。无边界设想意味着，这些密度差别是从它们的基态开始；也就是说，它们是和不确定性原理相一致的尽可能的小。然而，这些差别在暴胀时被放大了。在暴胀时期结束之后，留下的宇宙是一些地方比另一些地方膨胀得稍快一

些。在膨胀稍慢的区域，物质的引力吸引使膨胀进一步减慢。该区域最终会停止膨胀，并且收缩形成星系和恒星。这样，无边界设想可以解释我们四周看到的所有复杂结构。然而，它没有给宇宙作出单独的预言。相反地，它预言整整一族可能的历史，每一个历史都具有自己的概率。也许可能有这样的历史，工党在上次英国竞选中取胜，虽然这种概率很小。

无边界设想对于上帝在宇宙事务中的作用含义极其深远。人们现在广泛接受，宇宙按照定义很好的定律演化。这些定律可能是上帝钦定的，但是祂似乎不干涉宇宙去违反这些定律。然而，直到不久以前，人们都认为这些定律不能适用于宇宙的开初。那就要依赖上帝去旋紧发条，并让宇宙顺着祂的意愿去运行。这样，宇宙的现状是上帝对初始条件选择的结果。

然而，如果某种像无边界设想的东西是正确的话，则情况就大大改观。在那种情形下，物理定律甚至也适用于宇宙的开端，这样上帝就没有选取初始条件的自由。当然祂在选取宇宙要服从的定律上仍然具有自由。然而，这里并没有许多选择的余地。也许只存在很少数目的定律，这些定律是自洽的，并能导致像我们自己这么复杂的生物的存在，并能询问什么是上帝的本性。

甚至即使只存在唯一的一族可能的定律，它也只不过是一族方程。究竟是什么东西将生命之火赋予这些方程，使之产生一个受它们制约的宇宙呢？难道终极的统一理论是如此之咄咄逼人，以至于其自身的实现成为不可避免？虽然科学能解决宇宙如何起始的课题，它仍然无法回答这个问题：为何宇宙要在乎其存在？我对此没有答案。

第10章　黑洞的量子力学[15]

20世纪的最初30年出现了三种理论，它们激烈地改变人们对物理和实在本身的观点。物理学家们仍然在探讨它们的含义并尝试把它们协调在一起。这三种理论是狭义相对论（1905年）、广义相对论（1915年）以及量子力学理论（大约1926年）。阿尔伯特·爱因斯坦是第一种理论的主要创建者，是第二种理论的独立创建者，并且在第三种理论的发展中起过重要的作用。因为量子力学具有随机和不确定性的因素，所以爱因斯坦从未接受它。他的态度可用他经常被引用的“上帝不玩骰子”的陈述来总结。然而，由于不管是狭义相对论还是量子力学都能够描述可被直接观察的效应，所以绝大多数物理学家欣然同意并且接受它们。而另一方面，由于广义相对论似乎在数学上过于复杂，不能在实验室中得到检验，而且是似乎不能和量子力学相协调的纯粹经典的理论，所以它在大部分场合没有受到理会。这样，在几乎半个世纪的岁月里，广义相对论一直处于沉闷的状态。

从20世纪60年代初开始的天文观测的伟大进展，发现了许多新现象，诸如类星体、脉冲星和致密的X射线源。这一切表明非常强大的引力场的存在，这种引力场只能由广义相对论来描述，所以对广义相对论的经典理论的兴趣又被重新唤起。类星体是和恒星相似的物体，如果它们处于由它们的光谱的红化所标志的那么遥远的地方，则必须比整个星系还要亮好几倍；脉冲星是超新星爆发后快速闪耀的残余物，它被认为是超密度的中子星；致密的X射线源是由外太空飞行器上的仪器揭示的，也可能还是中子星或者是具有更高密度的假想的物体，也就是黑洞。

物理学家在把广义相对论应用到这些新发现的或者假想的物体时，所要面临的一个问题是，要使它和量子力学相协调。在过去的几年中有了一些发展，使人们产生了一些希望，不必等太久的时间我们将获得一种完全协调的量子引力论，这种理论对于宏观物体和广义相对论相一致，而且可望避免那种长期折磨其他量子场论的数学的无穷大。这些发展牵涉到最近发现的和黑洞相关的某些量子效应，它们为在黑洞和热力学定律之间提供了令人注目的连结。

让我简述一下黑洞是如何产生的。想象一颗具有10倍太阳质量的恒星。在大约10亿年寿命的大部分时间里，恒星在其中心把氢转化成氦而产生热。释放出的能量会产生足够的压力，以支持恒星抵抗自身的引力，这就产生了半径约为太阳半径5倍的物体。这种恒星表面的逃逸速度大约是每秒1000千米。也就是说，一个以小于每秒1000千米的速度从恒星表面点火垂直上升的物体，会被恒星的引力场拖回表面，而具有更大速度的物体会逃逸到无限远。

当恒星耗尽其核能时，那就没有东西可维持其向外的压力，恒星就由于自身的引力开始坍缩。随着恒星收缩，表面上的引力场就变得越来越强大，而逃逸速度就会增加。当恒星的半径缩小到30千米，其逃逸速度就增加到每秒30万千米，也就是光的速度。从此以后，任何从该恒星发出的光都不能逃逸到无限远，而只能被引力场拖曳回来。根据狭义相对论，没有东西可比光跑得更快。这样，如果光都不能逃逸，别的东西就更不可能。

其结果就是一颗黑洞：这是时空的一个区域，从这个区域不可能逃逸到无限远。黑洞的边界被称作事件视界。它对应于从恒星发出的刚好不能逃逸到无限远的，而只能停留在施瓦兹席尔德半径处徘徊的光线的波前。施瓦兹席尔德半径为$2GM/c\sqrt{c}$，这里G是牛顿引力常数，M是恒星质量，而c是光速。对于具有大约10倍太阳质量的恒星，其施瓦兹席尔德半径大约为30千米。

现在有了相当好的观测证据暗示，在诸如天鹅X-1的X射线源的双星系统中存在大约这个尺度的黑洞。也许还有相当数目的比这小得多的黑洞散落在宇宙之中。它们不是由恒星坍缩形成的，而是在炽热的高密度介质的被高度压缩区域的坍缩中产生的。人们相信在宇宙起始的大爆炸之后不久存在这样的介质。这种“太初”黑洞对我将在这里描述的量子效应具有重大的意义。一颗重10亿吨（大约一座山的质量）的黑洞具有10^{-13}厘米的半径（一颗中子或质子的尺度）。它也许正绕着太阳或者绕着银河系中心公转。

1970年的数学发现是在黑洞和热力学之间可能有联系的第一个线索。它是说事件视界，也就是黑洞边界的表面积具有这样的性质，当额外的物质或者辐射落进黑洞时它总是增加。此外，如果两颗黑洞碰撞并且合并成一颗单独的黑洞，围绕形成黑洞的事件视界的面积比分别围绕原先两颗黑洞的事件视界的面积的和更大。这些性质暗示，在一颗黑洞

的事件视界面积和热力学的熵概念之间存在某种类似。熵可被认为是系统无序的量度，或等价地讲，是对它精确状态的知识的缺失。著名的热力学第二定律说，熵总是随时间而增加。

华盛顿大学的詹姆斯·巴丁，现在任职于莫尔顿天文台的布兰登·卡特和我推广了黑洞性质和热力学定律之间的相似性。热力学第一定律说，一个系统的熵的微小改变伴随着该系统的能量成比例地改变。这个比例因子叫作系统的温度。巴丁、卡特和我发现了把黑洞质量改变和事件视界面积改变相联系的一个类似的定律。这里的比例常数牵涉到称为表面引力的一个量，它是引力场在事件视界的强度的测度。如果人们接受事件视界的面积和熵相类似，那么表面引力似乎就和温度相类似。可以证明，在事件视界上所有点的表面引力都是相等的，正如同处于热平衡的物体上的所有地方具有相同的温度。这个事实更加强了这种类比。

虽然在熵和事件视界面积之间很明显地存在着相似性，对于我们来说，如何把面积认定为黑洞的熵仍然不是显然的。黑洞的熵是什么含义呢？1972年雅各布·柏肯斯坦提出了关键的建议。他那时是普林斯顿大学的一名研究生，现在任职于以色列的涅吉夫大学。可以这么进行论证。由于引力坍缩而形成一颗黑洞，这颗黑洞迅速地趋向于一种稳定态，这种态只由三个参数来表征：质量、角动量和电荷。这个结论即是著名的“黑洞无毛定理”。它是由卡特、阿尔伯特大学的威纳·伊斯雷尔、伦敦国王学院的大卫·C.罗宾逊和我共同证明的。

无毛定理表明，大量信息在引力坍缩中被损失了。例如，最后的黑洞状态和坍缩物体是否由物质或者反物质组成，以及它在形状上是球形还是高度不规则形都没有关系。换言之，一颗给定质量、角动量以及电荷的黑洞可由物质的大量不同形态中的任何一种坍缩形成。的确，如果忽略量子效应的话，由于黑洞可由无限大数目的具有无限小质量的粒子云的坍缩形成，所以形态的数目是无限的。

然而，量子力学的不确定性原理表明，一颗质量为m的粒子的行为正像一束波长为h/mc的波，这里h是普朗克常数（一个值为6.62×10^{-27}尔格·秒的小数），而c是光速。为了使一堆粒子云能够坍缩形成一颗黑洞，其波长似乎必须小于它所形成黑洞的尺度。这样，能够形成给定质量、角动量和电荷的黑洞的形态数目虽然非常巨大，却可以是有限的。柏肯斯坦建议，可把这个数的对数解释成黑洞的熵。这个数的对数是在黑洞诞生时在坍缩通过事件视界之际的不可挽回地丧失的信息量的测

度。

柏肯斯坦的建议中含有一个致命的毛病，如果黑洞具有和它的事件视界面积成比例的熵，它就还应该具有有限的温度，该温度必须和它的表面引力成比例。这就意味着黑洞能和具有不为零温度的热辐射处于平衡。然而，根据经典概念，黑洞会吸收落到它上面的任何热辐射，而不能发射任何东西作为回报，所以这样的平衡是不可能的。

直到1974年初，当我根据量子力学研究物质在黑洞邻近的行为时，这个迷惑才得到解决。我非常惊讶地发现，黑洞似乎以恒定的速率发射出粒子。正如当时的所有人一样，我接受黑洞不能发射任何东西的正统说法。所以我付出了相当大的努力试图摆脱这个令人难堪的效应。它拒不退却，所以我最终只好接受之。最后使我信服它是一个真正的物理过程的是，飞出的粒子具有准确的热谱。黑洞正如同通常的热体那样发生和发射粒子，这热体的温度和黑洞的表面引力成比例并且和质量成反比。这就使得柏肯斯坦关于黑洞具有有限的熵的建议完全协调，因为它意味着能以某个不为零的有限温度处于热平衡。

从此以后，其他许多人用各种不同的方法确证了黑洞能热发射的数学证据。以下便是理解这种辐射的一种方法。量子力学表明，整个空间充满了“虚的”粒子反粒子对，它们不断地成对产生、分开，然而又聚到一块并互相湮灭。因为这些粒子不像“实的”粒子那样，不能用粒子加速器直接观测，所以被称作虚的。尽管如此，可以测量它们的间接效应。由虚粒子在受激氢原子发射的光谱上产生的很小位移（兰姆位移）证实了它们的存在。现在，在黑洞存在的情形，虚粒子对中的一个成员可以落到黑洞中去，留下来的另一个成员就失去可以与之相湮灭的配偶。这被背弃的粒子或者反粒子，可以跟随其配偶落到黑洞中去，但是它也可以逃逸到无限远去，在那里作为从黑洞发射出的辐射而出现。

另一种看待这个过程的方法是，把落到黑洞中去的粒子对的成员，譬如反粒子，考虑成真正地在向时间的过去方向旅行的一颗粒子。这样，这颗落入黑洞的反粒子可被认为是从黑洞跑出来但向时间过去旅行的一颗粒子。当粒子到达原先粒子反粒子对实体化的地方，它就被引力场散射，这样就使它在时间前进的方向旅行。

因此，量子力学允许粒子从黑洞中逃逸出来，这是经典力学不允许的事。然而，在原子和核子物理学中存在许多其他的场合，有一些按照

经典原理粒子不能逾越的壁垒，按照量子力学原理的隧道效应可让粒子通过。

围绕一颗黑洞的壁垒厚度和黑洞的尺度成比例。这表明非常少粒子能从一颗像假想在天鹅X-1中存在的那么大的黑洞中逃逸出来，但是粒子可以从更小的黑洞迅速地漏出来。仔细的计算表明，发射出的粒子具有一个热谱，其温度随着黑洞质量的减小而迅速增高。对于一颗太阳质量的黑洞，其温度大约只有绝对温度的千万分之一度。宇宙中的辐射的一般背景把从黑洞出来具有那种温度的热辐射完全淹没了。另一方面，质量只有10亿吨的黑洞，也就是尺度大约和质子差不多的太初黑洞，会具有大约1200亿开的温度，这相当于1000万电子伏的能量。处于这等温度下的黑洞会产生电子正电子对以及诸如光子、中微子和引力子（引力能量的假想的携带者）的零质量粒子。太初黑洞以60亿瓦的速率释放能量，这相当于6个大型核电厂的输出。

随着黑洞发射粒子，它的质量和尺度就稳恒地减小。这使得更多粒子更容易穿透出来，这样发射就以不断增加的速度继续下去，直到黑洞最终把自己发射殆尽。从长远看，宇宙中的每个黑洞都将以这个方法蒸发掉。然而对于大的黑洞它需要的时间实在是太长了，具有太阳质量的黑洞会存活10^{66}年左右。另一方面，太初黑洞应在大爆炸迄今的100亿年间几乎完全蒸发掉，正如我们所知的，大爆炸是宇宙的起始。这种黑洞现在应发射出能量大约为1亿电子伏的硬伽马射线。

当·佩奇和我在SAS-2卫星测量伽马辐射宇宙背景的基础上计算出，宇宙中的太初黑洞的平均密度必须小于大约每立方光年200颗。那时当·佩奇在加州理工学院。如果太初黑洞集中于星系的“晕”中，它在银河系中的局部密度可以比这个数目高100万倍，而不是在整个宇宙中均匀地分布。晕是每个星系都要嵌在其中的稀薄的快速运动恒星的薄云。这意味着最邻近地球的太初黑洞可能至少在冥王星那么远。

黑洞蒸发的最后阶段会进行得如此快速，以至于它会在一次极其猛烈的爆发中终结。这个爆发的激烈程度依赖于有多少不同种类的基本粒子。如果正如现在广为相信的，所有粒子都是由也许6种不同的夸克构成，则最终的爆炸会具有和大约1000万颗百万吨氢弹相等的能量。另一方面，日内瓦欧洲核子中心的H.哈格登提出了另一种理论。他论断道，存在质量越来越大的无限数目的基本粒子。随着黑洞变得越小越热，它就会发射出越来越多不同种类的粒子，就会产生比按照夸克假定计算的

能量大10万倍的爆炸。因此，观测黑洞爆发可为基本粒子物理提供非常重要的信息，这也许是用任何其他方式不能得到的信息。

一次黑洞爆发会倾注出大量的高能伽马射线。虽然可以用卫星或者气球上的伽马射线探测器观测它们，但要送上一台足够大的探测器，使之有相当的机会拦截到来自于一次爆炸的不少数量的伽马射线光子，是很困难的。使用航天飞机在轨道上建立一个大的伽马射线探测器是一种可能性。把地球的上层大气当成一台探测器是另外一种更容易也更便宜的做法。穿透大气的高能伽马射线会产生电子正电子暴，它们在大气中的初速度比大气中的光速还快。（光由于和空气分子相互作用而减慢下来。）这样，电子和正电子将建立起一种声暴，或者是电磁场中的冲击波。这种冲击波叫作切伦科夫辐射，能以可见光闪烁的形式从地面上观测到它。

都柏林大学学院的奈尔·A.波特和特勒伏·C.威克斯的一个初步实验指出，如果黑洞按照哈格登理论预言的方式爆炸，则在我们银河系的区域中只有少于每世纪每立方光年两次的黑洞爆发。这表明太初黑洞的密度小于每立方光年1亿颗。我们有可能极大地提高这类观测的灵敏度。即便没有得到太初黑洞的任何肯定的证据，它们仍然是非常有价值的。观测结果在这种黑洞的密度上设下一个低的上限，表明早期宇宙必须是光滑和安宁的。

大爆炸和黑洞爆炸相类似，只不过是在一个极大的尺度范围内而已。所以人们希望，理解黑洞如何创生粒子将导致类似地理解大爆炸如何创生宇宙中的万物。在1颗黑洞中，物质坍缩并且永远地损失掉，但是新物质在该处创生。所以事情也许是这样的，存在宇宙更早的一个相，物质在大爆炸处坍缩并且重新创生出来。

如果坍缩并形成黑洞的物质具有净电荷，则产生的黑洞将携带同样的电荷。这意味着该黑洞喜欢吸引虚粒子反粒子对中带相反电荷的那个成员，而排斥带相同电荷的成员。因此，黑洞优先地发射和它同性的带电粒子，从而迅速地丧失其电荷。类似地，如果坍缩物质具有净角动量，产生的黑洞便是旋转的，并且优先地发射携带走它角动量的粒子。由于坍缩物质的电荷、角动量和质量与长程场相耦合：在电荷的情形和电磁场耦合，在角动量和质量的情形和引力场耦合，所以黑洞“记住”了这些参数，而“忘记”了其他的一切。

普林斯顿大学的罗伯特·H.狄克和莫斯科国立大学的弗拉基米尔·布拉津斯基进行的实验指出，不存在和命名为重子数的量子性质相关的长程场。（重子是包括质子和中子在内的粒子族。）因此由一群重子坍缩形成的黑洞会忘掉它的重子数，并且发射出等量的重子和反重子。所以，当黑洞消失时，它就违反了粒子物理的最珍贵定律之一，重子守恒定律。

虽然为了和柏肯斯坦关于黑洞具有有限熵的假设协调，黑洞必须以热的方式辐射，但是粒子产生的仔细量子力学计算引起带有热谱的发射，初看起来似乎完全是一桩奇迹。这可以解释成，发射的粒子从黑洞的一个外界观测者除了它的质量、角动量和电荷之外对之毫无所知的区域穿透出来。这意味着具有相同能量、角动量和电荷的发射粒子的所有组合或形态都是同等可能的。的确，黑洞可能发射出一台电视机或者十卷皮面包装的《蒲鲁斯特[16]全集》，但是对应于这些古怪可能性的粒子形态的数目极端接近于零。迄今最大数目的形态是对应于几乎具有热谱的发射。

黑洞发射具有超越通常和量子力学相关的额外的不确定性或不可预言性。在经典力学中人们既可以预言粒子位置，又可以预言粒子速度的测量结果。量子力学的不确定性原理讲，只能预言这些测量中的一个，观察者能预言要么位置要么速度的测量结果，不能同时预言两者。或者他能预言位置和速度的一个组合的测量结果。这样，观察者作明确预言的能力实际上被减半了。有了黑洞情形就变得更坏。由于被黑洞发射出的粒子来自于观察者只有非常有限知识的区域，他不能明确预言粒子的位置或者速度或者两者的任何组合；他所能预言的一切是某粒子被发射的概率。所以这样看来，爱因斯坦在说“上帝不玩骰子”时，他是双重地错了。考虑到从黑洞发射粒子，似乎暗示着上帝不仅玩弄骰子，而且有时把它们扔到看不见的地方。

第11章　黑洞和婴儿宇宙[17]

落到黑洞中去已成为科学幻想中的恐怖一幕。现在黑洞已在事实上被说成是科学的现实，而非科学的幻想。正如我所要描述的，我们已有很强的理由预言黑洞必然存在。观测证据强烈地显示，在我们自身的银河系中有些黑洞，而在其他星系中则更多。

当然，科学幻想作家真正做到家的是，描述你掉到一颗黑洞中去将会发生什么。不少人认为，如果黑洞在旋转的话，你便可穿过时空的一个小洞而到宇宙的另一个区域去。这显然产生了空间旅行的巨大可能性。如果我们要想到别的恒星，且不说到别的星系旅行在未来成为现实，这的确是我们梦寐以求的东西。否则的话，没有东西可比光旅行得更快的这一事实意味着，往返最邻近的恒星至少也需要8年时间。这就是到半人马座α星度周末所需要的时间！另一方面，如果人们能穿过一颗黑洞，就可在宇宙中的任何地方重新出现。怎么选取你的目的地还不很清楚，最初你也许想到处女座度假，而结果却到了蟹状星云。

非常遗憾地我要让未来的星系旅行家们失望了，这个场景是行不通的。如果你跳进一颗黑洞，就会被撕得粉碎。然而，在某种意义上，构成你身体的粒子会继续跑到另一个宇宙中去。我不清楚，某个在黑洞中被压成意大利面条的人，如果得知他的粒子也许能存活的话，是否对他是很大的安慰。

尽管我在这里采用了稍微轻率的语气，这篇讲演却是基于可靠的科学作为根据。我在这里讲的大部分现在已得到在这个领域作研究的其他科学家的赞同，尽管这是发生在新近的事。然而，这篇讲演的最后部分是根据还没有达成共识的最近的工作。但是这个工作引起了巨大的兴趣和激动。

虽然我们现在称作黑洞的概念可以回溯到200多年前，但是黑洞这个名字是晚到1967年才由美国物理学家约翰·惠勒提出来的。这真是一项天才之举：这个名字本身就保证黑洞进入科学幻想的神秘王国。为原先没有满意名字的某种东西提供确切的名字也刺激了科学研究。在科学中不可低估好名字的重要性。

就我所知，首先讨论黑洞的是一位名叫约翰·米歇尔的剑桥人，他在1783年写了一篇有关的论文。他的思想如下：假设你在地球表面上向上点燃一颗炮弹。在它上升的过程中，其速度由于引力效应而减慢。它最终会停止上升而落回到地球上。然而，如果它的初速度大于某个临界值，它将永远不会停止上升并落回来，而是继续向外运动。这个临界速度称为逃逸速度。地球的逃逸速度大约为每秒7英里，太阳的逃逸速度大约为每秒100英里。这两个速度都比实际炮弹的速度大，但是它们比起光速来就太小了，光速是每秒186000英里。这表明引力对光的影响甚微，光可以毫无困难地从地球或太阳逃逸。可是，米歇尔推论道，也许可能有这样的一颗恒星，它的质量足够大而尺度足够小，这样它的逃逸速度就比光速还大。因为从该恒星表面发出的光会被恒星的引力场拉曳回去，所以它不能到达我们这里，因此我们不能看到这颗恒星。然而，我们可以根据它的引力场作用到附近物体上的效应检测到它的存在。

把光当作炮弹处理是不自洽的。根据在1897年进行的一项实验，光线总是以恒常速度旅行。那么引力怎么能把光线减慢呢？直到1915年爱因斯坦提出广义相对论后，人们才有了引力对光线效应的自洽理论。尽管如此，直到20世纪60年代，人们才广泛意识到这个理论对老的恒星和其他大质量物体的含义。

根据广义相对论，空间和时间一起被认为形成称作时空的四维空间。这个空间是不平坦的；它被在它当中的物质和能量所畸变或者弯曲。在向我们传来的光线或者无线电波于太阳附近受到的弯折中可以观测到这种曲率。在光线通过太阳邻近的情形时，这种弯折非常微小。然而，如果太阳收缩到只有几英里的尺度，这种弯折就会厉害到这种程度，即从太阳表面发出的光线不能逃逸出来，它被太阳的引力场拉曳回去。根据相对论，没有东西可以比光旅行得更快，这样就存在一个任何东西都不能逃逸的区域。这个区域就叫作黑洞。它的边界称为事件视界。它是由刚好不能从黑洞逃出而只能停留在边缘上徘徊的光线形成的。

假定太阳能收缩到只有几英里的尺度，听起来似乎是不可思议的。人们也许认为物质不可能被压缩到这种程度。但是在实际上这是可能的。

太阳具有现有的尺度是因为它是这么热。它正在把氢燃烧成氦，如同一颗受控的氢弹。这个过程中释放出的热量产生了压力，这种压力使

太阳能够抵抗得住自身引力的吸引，正是这种引力使得太阳尺度变小。

然而，太阳最终会耗尽它的核燃料。这要发生也是在再过大约50亿年以后的事，所以不必焦急订票飞到其他恒星去。然而，具有比太阳更大质量的恒星会更迅速地耗尽其燃料。在燃料用尽后就开始失去热量并且收缩。如果它们质量大约比太阳质量的两倍还小，就最终会停止收缩，并且趋向于一种稳定的状态。这样的状态之一叫作白矮星。它们具有几千英里的半径和每立方英寸几百吨的密度。另一种这样的状态是中子星。它们具有大约10英里的半径和每立方英寸几百万吨的密度。

在银河系我们紧邻的区域观察到大量的白矮星。然而，直到1967年约瑟琳·贝尔和安东尼·赫维许在剑桥才首次观测到中子星。那时他们发现了称作脉冲星的发出射电波规则脉冲的物体。最初，他们惊讶是否和外星文明进行了接触。我的确记得，在他们要宣布其发现的房间里装饰了“小绿人”的图样。然而，他们和所有其他人最后只能得出不太浪漫的结论，这些物体原来是旋转的中子星。对于写太空西部人的作家，这是个坏消息，而对于我们这些当时相信黑洞的少数人，却是个好消息。如果恒星能缩小到10—20英里的尺度，而变成中子星，人们便可以预料，其他恒星能进一步收缩而变成黑洞。

质量大约比太阳质量两倍更大的恒星不能稳定成为一颗白矮星或中子星。在某种情形下，该恒星可以爆炸，并抛出足够的质量，使余下的质量低于这个极限。但是总有例外。有些恒星会变得这么小，它们的引力场会把光线弯折到这种程度，使它折回到恒星本身上去。不管是光线还是别的任何东西都不能逃逸出来。该恒星已经变成为一颗黑洞。

物理定律是时间对称的。如果存在东西能落进去而不能跑出来的叫作黑洞的物体，那就还应该存在东西能跑出来而不能落进去的其他物体。人们可以把这些物体叫作白洞。人们可以猜测，一个人可以在一处跳进一颗黑洞，而在另一处从一颗白洞跑出来。这应是早先提到长距离空间旅行的理想手段。你所需要做的一切是去寻找一颗邻近的黑洞。

这种形式的空间旅行初看起来是可能的。爱因斯坦的广义相对论中存在这类解，它允许人往一颗黑洞落进再从一颗白洞跑出来。然而，后来的研究表明，所有这些解都是非常不稳定的：最为微小的扰动，譬如空间飞船的存在都会把这个“虫洞”即从黑洞到白洞的通道消灭。空间飞船会被无限强大的力量撕得粉碎。这正如同躲藏在大桶里从尼亚加拉瀑

布漂下去一样。

这样一来，旅行似乎没希望了。黑洞也许可以用来摆脱垃圾甚至人们的某些朋友。但它们是“旅行者有去无归的国度”。然而，我到此为止所说的一切都是根据利用爱因斯坦的广义相对论所进行的计算。这个理论和我们迄今的一切观测都吻合得极好。但是，由于它不能和量子力学的不确定性原理合并，所以我们知道它不可能完全正确。不确定性原理是说，粒子不能同时把位置和速度都很好地确定。你把一颗粒子的位置测量得越精确，则对它的速度就测量得越不精确，反之亦然。

1973年我开始研究不确定性原理会对黑洞有什么改变。使我和其他所有人大吃一惊的是，我发现它意味着黑洞不是完全黑的。它们以恒定的速率发射辐射和粒子。当我在牛津附近的一次会议上宣布这些结果时，大家都不相信。分会主席说，这些是没有意义的，而且他还写了一篇论文重申。然而，在其他人重复我的计算时，他们发现了相同的效应。这样，就连该主席最终也同意了我是正确的。

辐射是如何从黑洞的引力场中逃逸出来的呢？我们有好几种办法来理解。虽然它们显得非常不同，其实是完全等效的。一种方法是，不确定性原理允许粒子在短距离内旅行得比光还快。这就使得粒子和辐射能穿过事件视界从黑洞逃逸。然而，从黑洞出来的东西和落进去的东西不同。只有能量是相同的。

随着黑洞释放粒子和辐射，它将损失质量。这将使黑洞变得越来越小，并更迅速地发射粒子。它最终会达到零质量并完全消失。对于那些落入黑洞的物体，还可能包括空间飞船都会发生什么呢？根据我的一些最新的研究，其答案是，它们会出发到它们自身的微小的婴儿宇宙中去。一个小的自足的宇宙从我们的宇宙区域分叉开来。这个婴儿宇宙可以重新连接到我们的时空区域。如果发生这种情形，它在我们看来是另一个黑洞形成并随后蒸发掉。落进一个黑洞的粒子会作为从另一个黑洞发射的粒子而出现，反之亦然。

这听起来似乎正是允许通过黑洞进行空间旅行所需要的。你只要驾驶你的空间飞船进入适当的黑洞，最好是相当巨大的黑洞。否则的话，在你进入黑洞之前引力就已经把你撕成意大利面条。你可望在另外一颗黑洞外面重新出现，尽管你不能选择在什么地方。

然而，在这种星系际运送规划中有一个意外的障碍。把落入黑洞的粒子取走的婴儿宇宙是在所谓的虚时间里发生的。在实时间里，一位落进黑洞的航天员的结局是悲惨的。作用到他头上和脚上的引力差会把他撕开来。甚至连构成他身体的粒子都不能幸免。它们在实时间里的历史会在一个奇点处终结。但是，粒子在虚时间里的历史将会继续。它们将进入并通过婴儿宇宙，而且作为从另外一颗黑洞发射出来的粒子而重现，这样，在某种意义上可以说，航天员被运送到宇宙的另一个区域。可是，出现的粒子和航天员没有什么相像之处。当他在实时间中进入奇点时，也不会因得知他的粒子将在虚时间里存活，而得到什么安慰。对于任何落进黑洞的人的箴言是：“想想虚的”。

是什么东西确定粒子在何处重现呢？婴儿宇宙中的粒子数目等于落进该黑洞的粒子数目加上在它蒸发时发射的粒子数目。这表明，落入一颗黑洞的粒子将从另一颗具有大致相等质量的黑洞出来。这样，人们可由创造一颗与粒子所落进的黑洞相同质量的黑洞，来选择粒子出来的地方。然而，该黑洞会同等可能地发出具有相等总能量的任何其他的粒子集合。即便该黑洞的确发射出恰当种类的粒子，人们仍然不能分辨它们是否就是落进另一颗黑洞的那些粒子。粒子不携带身份证，给定种类的所有粒子都显得很相像。

这一切表明，穿越黑洞并非空间旅行的受人欢迎的可靠办法。首先，你必须在虚时间里旅行才到达那里，而不理睬你的历史在实时间里达到悲惨的结局。其次，你不能随意选择自己的目的地。这就像在某些我说得出名字的航线上旅行。

虽然婴儿宇宙对于空间旅行无甚用处，但对于我们寻求能描述宇宙万物的完备的统一理论的尝试却意义重大。我们现有理论包括一些量，譬如一颗粒子所带电荷的大小。我们的理论不能够预言这些量。相反地，它们必须选取得和观测相符合。可是，多数科学家相信，存在一种基本的统一理论，它能把所有这些量都预言出来。

很可能存在一种这样的基本理论。所谓异型超弦是目前最有前途的候选者。其思想是时空充满了许多像一根弦似的小圈圈。我们认为是基本粒子的实际上是这些以不同方式振动的小圈圈。这种理论不包含任何数值可以被调整的数。于是人们预料，这种统一理论应能预言出所有这些量的数值，譬如一颗粒子所带的电荷，那是现有理论不能确定而遗留下来的量。虽然我们还不能从超弦理论预言这些量中的任何一个，但是

很多人相信，我们最终能够做到这一点。

然而，如果婴儿宇宙的图像是正确的，我们预言这些量的能力就被降低。这是因为我们不能观察到在那里存在多少个婴儿宇宙，等待着和我们的宇宙区域相连接。有的婴儿宇宙只包含一些粒子。这些婴儿宇宙如此之微小，人们觉察不出它们的连接和分叉。可是，它们连接上后就改变了诸如一颗粒子所带电荷的量的表观的值。这样，因为我们不知道有多少婴儿宇宙等待在那里，所以我们就预言不出这些量的表观值。也可能出现婴儿宇宙的数量爆炸。然而和人类不同的是，似乎没有诸如食物供应和站立空间的限制因素。婴儿宇宙存在于它们自身的实在之中。它有点像问在针尖上可容纳多少个天使跳舞的问题。

婴儿宇宙似乎为大多数的量的预言值引进了一定的哪怕是相当小的不确定性。然而，它们可以为一个非常重要的量，即所谓宇宙常数的观测值提供一种解释。这是使时空具有膨胀或者收缩的内在倾向的广义相对论方程的一项。爱因斯坦提出一个非常小的宇宙常数，原意是希望用以平衡物质使宇宙收缩的倾向。在人们发现宇宙是在膨胀后这个动机即不复存在。但是要摆脱宇宙常数绝非易事。人们可以预料，量子力学隐含的起伏会给出非常大的宇宙常数。但是，我们能够观测宇宙的膨胀如何随时间而变化，从而确定宇宙常数是非常小的。迄今为止，对观察值为什么必须这么微小还没有找到任何好的解释。然而，婴儿宇宙的分叉出去和连接回来会影响宇宙常数的表观值。因为我们不知道有多少个婴儿宇宙，宇宙常数就可能有不同的表观值。然而，一个几乎为零的值，是最有可能的。这是令人庆幸的，因为只有当宇宙常数非常微小时，宇宙才适合像我们这样的生物居住。

可以总结一下：看来粒子能够落进黑洞，然后黑洞蒸发并从我们的宇宙区域消失。这些粒子进入婴儿宇宙中。这些婴儿宇宙从我们的宇宙分叉出去。这些婴儿宇宙可以连接回到其他的什么地方。它们对空间旅行无甚用处，但是它们的存在意味着我们预言能力比所期望的更差，即便我们真的找到了完整的统一理论。另一方面，我们现在也许能为某些像宇宙常数的量的测量值提供解释。过去的几年里，好多人开始研究婴儿宇宙。我认为没有人把它们作为空间旅行的方法而申请专利致富，但是它们已成为非常激动人心的研究领域。

第12章　一切都是注定的吗？[18]

在《裘里乌斯·恺撒》这部戏剧里，卡修斯告诉布鲁特斯说：“人们有时是他们命运的主宰。”我们真的是自己命运的主宰吗？或者我们的所作所为无一不是被确定的，或者说是注定的？赞同宿命论的论证通常是这么进行的，上帝是万能的并且外在于时间，所以上帝知道将会发生什么。但是如果这样的话，我们怎么还会有自由意志呢？而如果我们没有自由意志的话，又怎么能为我们的行动负责呢？如果一个人注定要去抢银行，这不能算是他的过错。那么，为什么他要为此而受惩罚呢？

人们近年来根据科学来论证宿命论。事情似乎是这样的，存在定义很好的定律，这些定律制约宇宙和其中的任何事物在时间中如何发展。虽然我们还没找到所有这些定律的精确形式，我们却已经知道得足够多，能够确定，在除了最极端情形外的所有情形下，要发生什么。我们能否在相当近的未来找到余下的定律是见仁见智的事。我是一个乐观主义者：我认为有对半的机会在以后的20年内找到它们。但是即使找不到，也不会对这里的议论有丝毫影响。其要点在于，必须存在一族能从宇宙的初始态完全确定其演化的定律。这些定律也许是由上帝颁布的。但是祂不干涉宇宙去违反这些定律。

上帝也许选取了宇宙的初始形态，或者这种形态本身是由科学定律确定的。无论是何种情形，宇宙中的任何事物似乎都是由根据科学定律的演化所确定的，所以很难看出我们何以成为自己命运的主宰。

存在某种确定宇宙中任何事物的大统一理论的思想引起了许多困难。首先，人们假定这种大统一理论在数学上是紧凑而优雅的。关于万物的理论必须有某种既特殊又简单的东西。那么一定数目的方程怎么能解释我们在自己周围看到的复杂性和无聊的细节呢？人们真的会相信大统一理论确定西尼德·奥柯诺[19]会出现在本周黄金歌曲榜首，或者麦当娜[20]会印在《大都会》的封面上？

大统一理论确定任何事物的思想的第二个问题是，我们所说的任何东西也由该理论所确定。但是为什么它必须被确定为正确的呢？因为对应于每一个真的陈述都可能有许多不真的陈述，它不是更可能是不真的吗？我每周的邮件中都有大量别人寄来的理论。它们都不相同，而且大

多数是相互冲突的。假定大统一理论确定了这些作者认为他们是正确的，那么为何我说的任何东西就必须更有效呢？难道我不是同样地由大统一理论确定的吗？

一切都是注定的思想的第三个问题是，我们自己觉得具有自由意志——我们有选择是否做某事的自由。但是如果科学定律确定了一切，则自由意志就必然是幻影。而如果我们没有自由意志，为我们行为负责的根据又是什么？我们不会对精神病人定罪，因为我们认定他的行为是身不由己的。但是如果大统一理论把我们完全确定，我们之中无人不是身不由己的，那么为何要为其所作所为负责呢？

人们对于宿命论的这些问题已经讨论了几世纪。然而，由于我们离完全掌握科学定律的知识还差得很远，而且不知道如何确定宇宙的初始状态，所以讨论就显得有些学究气。由于我们可能在短到20年的时间内找到一套完备的统一理论，这个问题现在就变得更急迫了。而且我们意识到，初始状态本身可能是由科学定律确定的。以下便是我自己解决这些问题的尝试。我并不宣称具有多少原创性或深度，但它是我此刻所能做的一切。

从第一个问题开始：我们观察到的宇宙是如此之复杂，还具有许多无聊和次要的细节，一套相对简单和紧凑的理论怎么能把这种宇宙产生出来呢？这个问题的关键是量子力学的不确定性原理，它是说人们不能既把粒子的速度又把粒子的位置极其精确地测量出来。你把位置测量得越精确，则你测量的速度就越不精确，反之亦然。在现时刻这种不确定性不甚重要，因为东西被分隔得很开，位置上的很小不确定性不会造成很大差别。但是在极早期宇宙任何东西都靠得很近，这样就有了大量的不确定性，宇宙有许多可能的状态。这些不同的可能的极早的态会演化成宇宙的整个一族不同的历史。这些历史中的大多数在它们的大尺度特征上都很相似。它们对应于一个均匀和光滑的，并且正在膨胀的宇宙。然而，它们在诸如恒星分布以及进而在它们杂志封面设计等细节上不同。（那是说，如果那些历史包括杂志的话。）这样，围绕我们宇宙的复杂性以及细节是极早期阶段的不确定性原理引起的。这就给出了整整一族宇宙的可能历史。可能存在一个纳粹赢得第二次世界大战的历史，虽然这种概率很小。但是我们刚好生活在盟军赢得战争，麦当娜出现在《大都会》封面上的历史之中。

现在我转向第二个问题：如果某种统一理论确定了我们所要做的一

切，为什么该理论必须确定我们得出关于宇宙的正确的而非错误的结论呢？为何我们说的任何东西必须成立？我对这个问题的答案是基于达尔文自然选择的思想。我同意，某些非常初级的生命形式在地球上是由原子的随机组合而自动产生的。这种生命的早期形式也许是一个大分子。由于由随机组合形成整个DNA分子的机会很小，所以这个大分子不大可能是DNA。

生命的早期形式会复制自己。量子不确定性原理和原子的随机热运动意味着，在复制中存在一定的误差。这些误差中的大多数对于机体的存活及其复制的能力是致命的。这些误差不会传给后代而是消失了。纯粹出于机遇，极少数的误差是有益的。具有这些误差的机体更容易存活和复制。这样，它们就趋向于取代原先的未改进的机体。

DNA的双螺旋结构的发展可能是早期阶段的这么一种改善。这样的一种进展可能完全取代了更早先的生命形式，不管那种形式是什么样子的。随着向前进化，导致了中心神经系统的发展。正确识别由它们感官收集到的信息的意义，并能采取适当行动的生物更容易存活和复制。人类又把这一切推向另一阶段。我们和更高等的猿人之间无论是在身体还是在DNA方面都非常相似；但是在我们DNA上的一个微小的差异使我们能发展语言。这表明，我们能够逐代地传递信息并积累经验。在更早以前，经验的结果只能通过复制时的随机误差被编码到DNA中的缓慢过程来传递下去。这个效应大大加速了演化。演化到人类花费了比30亿年还长的岁月。但是我们仅仅在这最后的1万年过程中发展了书写语言。这使得我们能从穴居者进化到能探究宇宙终极理论的现代人类。

人类的DNA在过去的1万年间并没有显著的生物进化或改变。这样，我们的智力，我们从感官提供的信息提取正确结论的能力必须回溯到我们穴居者或者更早的岁月。这必定是在我们杀死某些种类动物为食，并避免被其他动物杀害的能力的基础上被选择出来的能力。为了这些目的而被选择出来的精神品质，在今天非常不同的环境下，使我们处于非常有利的地位，这一点真令人印象深刻。发现大统一理论或者解答有关宿命论的问题，也许不会给我们带来太多存活上的好处。尽管如此，我们由于其他原因发展而来的智力，能够保证我们找到这些问题的正确答案。

现在我转向第三个问题，即自由意志和对我们行为负责的问题。我们主观地觉得，我们有选择我们是谁以及我们做什么的能力。但是这也

许只不过是幻觉。有些人自认为是耶稣基督或者拿破仑，但是他们不可能都对。我们需要的是一种客观的检验，可以使用它从外面来鉴定一个机体是否具有自由意志。例如，从某个恒星有个“小绿人”来访问我们。我们怎么才能决定它具有自由意志，或者仅仅是一台被编入使它像我们一样反应的程序的机器人呢？

自由意志的最终客观检验似乎应该是：人们能预言一个机体的行为吗？如果能的话，则很清楚表明它没有自由意志，而仅仅是预先确定的。另一方面，如果人们不能预言其行为，则人们可以将此当作一个操作定义，说该机体具有自由意志。

人们可用以下的论证来反对这个自由意志的定义，即一旦我们找到了完备的统一理论，我们就能预言人们将做什么。然而，人类头脑也要服从不确定性原理。这样，在人类的行为中存在和量子力学相关的随机因素。但是在头脑牵涉到的能量很小，所以量子力学的不确定性只有微小的效应。我们不能预言人类行为的真正原因只是它过于困难。我们已经知悉制约头脑活动的基础物理定律，而且它们是比较简单的。但是在解方程时只要有稍微多的粒子参与就会解不出。即便在更简单的牛顿引力论中，人们只能在两颗粒子的情形下精确地解这个方程。对于三颗或更多的粒子就必须借助于近似法，而且其难度随粒子数目而急剧增加。人类头脑大约包含10^{26}也就是100亿亿亿颗粒子。在给定的初始条件和输入的神经资料下，要去解这个方程，并从而预言头脑的行为，这个数目是太过于庞大了。当然，我们在事实上甚至不能测量初始条件，因为要这么做的话就得把头脑拆散。甚至我们打算这么做的话，粒子数也太大了以至于记录不过来。而且头脑可能对于初始条件非常敏感，初始态的一个小改变就会对后续行为造成非常大的差别。这样，虽然我们知道制约头脑的基本方程，我们根本不可能利用它们来预言人类的行为。

由于在宏观系统中粒子的数目总是太大，我们根本无法求解这些基本方程，所以只要我们处理这样的系统，就会在科学上产生这种情形。取而代之，我们要做的是利用有效理论。这是用少数的量来取代非常大数目粒子的近似法。流体力学便是一个例子。譬如像水这样的流体是由亿万个分子组成的，而分子本身又是由电子、质子和中子所构成。然而，把流体处理成仅仅由速度、密度和温度表征的连续介质是一种好的近似。流体力学有效理论的预言不准确，人们只要听听天气预报即能意识到这一点。但是它对于设计船舶和油管却是足够好的近似。

我想提出，自由意志和自我行为的道德责任概念真正是在流体力学意义上的有效理论。也许我们做的任何事情都是由某种大统一理论所确定的。如果那种理论确定我们将被吊死，我们就不会被淹毙。也就是说，即便把你在暴风雨之际放在海上的小舟上，你仍然非常肯定其目标是绞架。我曾经注意到，甚至声称一切都是注定的，而且我们不能对之有任何改变的人们，在他们穿越马路时也要先看一看安全否。也许是因为那些不看路的人不能存活来告诉我们这个过程。

因为人们不知道什么是确定的，所以不能把自己的行为基于一切都是注定的思想之上。相反地，人们必须采取有效理论，也就是人们具有自由意志以及必须为自己的行为负责。这个理论在预言人类行为方面不很有效。因为我们无法求解从基本定律推出的方程，所以只好采用它。我们相信自由意志还有达尔文主义的原因：一个其成员对于他或她的行为负责的社会更容易合作、存活并扩散其价值。蚂蚁当然合作得很好，但是这样的社会是静止的。它不能应付陌生的挑战或者发展新的机遇。然而，一些怀有某些共同目标的自由个体集合能在共同目标上合作，而且还有创新的灵活性。因此，这样的社会更容易繁荣并且扩散其价值系统。

自由意志的概念和科学的基本定律是属于不同的范畴。如果人们想从科学定律推出人类行为的话，他就会在自参考系统的逻辑悖论中陷入困境。如果可以从基本定律预言出一个人的所作所为，则做此预言本身这个事实就可以改变所要发生的。这正如时间旅行若可能的话人们会遇到的麻烦，我认为永远不可能做时间旅行。如果你能看到未来将要发生什么，你就能改变之。如果你知道在全国大赛中哪匹马会赢，你就可以为它下赌金而发财。但是那个行动会改变胜算。人们只有看电影《回到未来》就会意识到会发生什么问题。

关于能否预言人们行为的悖论和我早先提及的问题紧密相关：终极理论是否确定我们在有关终极理论的问题上得到正确的结论？在那种情形下，我论证道：达尔文的自然选择思想会使我们得到正确的答案。正确的答案也许不是描述它的正确方法，但是自然选择至少使我们获得一套相当有效的物理定律。然而，我们因为两个原因不能应用那些物理定律去推导出人类行为。首先，我们不能求解这些方程。其次，即使我们能解，做预言的这一事实会扰动该系统。相反地，自然选择看来导致我们采用自由意志的有效理论。如果人们接受一个人的行为是自由选择

的，那么他就不能争辩道，在某种情形下这些行动是由外界的力量所确定的。“几乎自由的意志”的概念是没有意义的。但是人们容易把人们可以猜出另一个人很可能选择什么和这种选择不是自由的概念相混淆。我猜想你们中的大多数今晚要吃饭，但是你完全有选择饿肚子上床的自由。开脱责任的教条即是这类混淆的一个例子：它的意思是说人不应为紧张状态下的行为而受到惩罚。人在紧张时是可能容易犯刑事罪。但是那不意味着，我们应该减轻惩罚使他或她更容易犯罪。

人们必须把科学基本定律的研究和人类行为的研究分开来。由于我已经解释的原因，人们不能利用基本定律推导出人类行为。但是人们期望使用逻辑思维的智慧和威力，这是我们通过自然选择发展来的。可惜的是，自然选择也发展了诸如侵略性的其他特征。在穴居者或更早的时代侵略性具有存活的优势，所以自然选择对它有利。然而，现代科学技术极大地提高了我们的破坏力，使得侵略性变成非常危险的品质，这是一种威胁到全人类生存的危险性。麻烦在于，我们的侵略本性似乎被编码到我们的DNA之中。生物进化只有在几百万年的时间尺度上才改变DNA，但是我们的破坏力以信息演化的时间尺度为尺度而增加，这种尺度在目前只有二三十年。除非我们能够用智慧来控制侵略性，人类的未来就非常不妙。我仍然要说，只要有生命就会有希望。如果我们能再存活一个世纪左右，我们就能扩散至其他行星，甚至其他恒星上去。这就使得全人类被诸如核战争的灾难毁灭的可能性大为减少。

小结一下：我讨论了，如果人们相信宇宙中的一切都是注定的话，会引起的一些问题。这种宿命论究竟是因为一位万能的上帝还是科学定律引起的，并不具有任何差别。的确，人们总可以说，科学的定律是上帝意愿的表达。

我考虑了三个问题：首先，一族简单的方程何以确定宇宙的复杂性以及它所有无聊的细节？换言之，人们会真正地相信，上帝选择了所有无聊的细节，譬如谁应该被印在《大都会》的封面上呢？其答案似乎应该是，量子力学的不确定性原理意味着，宇宙不是仅有一个单独的历史，而是有整族可能的历史。这些历史在大尺度下也许是类似的，但在正常的日常的尺度下它们具有极大的差异。我们刚好生活在一个具有一定性质和细节的特定历史中。但是存在非常类似的智慧生物，他们生活在谁赢得战争和谁是顶尖通俗歌手上不同的历史中。因此，我们宇宙的无聊细节之所以产生，是因为基本定律和具有不确定性或随机性的量子

力学相结合。

第二个问题是：如果某种基本理论确定了一切，那么我们关于该理论所说的一切也应该由该理论所确定——为什么它必须被确定为是正确的，而非全错的或无关的？我对此的答案是借助于达尔文的自然选择理论：只有那些关于围绕他们的宇宙得出合适结论的个体才容易存活和繁殖。

第三个问题是：如果一切都是注定的，那么自由意志和我们对自己行为的责任又从何而来？但是对一个机体是否具有自由意志的唯一客观的检验是它的行为是否可被预言。在人类的情形下，由于两个原因，我们无法利用基本定律去预言人们将要做什么。首先，我们不能求解涉及大量粒子的方程。其次，即便我们能解这些方程，做预言的事实会干扰系统并会导致不同的结果。这样，由于我们不能预言人类的行为，我们也可以采用这样的有效理论，说人类是可以自作自划的自由个体。相信自由意志并为自己行为负责看来肯定具有存活的优势。这意味着自然选择应加强这种信念。由语言传递的责任心是否足以控制DNA传递的侵略本性还有待观察，如果不能的话，人类将成为自然选择的一个死亡终点。也许银河系其他地方的某种其他智慧生物在责任心和侵略性上得到更好的平衡。但是，如果事情果真如此，我们可以预料被他们接触过，或者至少检测过他们的无线电信号。也许他们知悉我们的存在，但是不想把自己暴露给我们。回顾一下我们过去的记录，这样做也许是明智的。

总之，这篇文章的题目是一个问题：一切都是注定的吗？答案是“是”，的确是“是”。但是其答案也可以为“不是”，因为我们永远不知道什么是被确定的。

第13章　宇宙的未来[21]

这篇讲演的主题是宇宙的未来，或者不如说，科学家认为将来是什么样子的。预言将来当然是非常困难的。我曾经起过一个念头，要写一本题为《昨天之明天：未来历史》的书。它会是一部对未来预言的历史，几乎所有这些预言都是大错特错的。但是尽管这些会失败，科学家仍然认为他们能预言未来。

在非常早的时代，预言未来是先知或者女巫的职责。这些通常是被毒药或火山隙逸出的气体弄得精神恍惚的女人。周围的牧师把她们的咒语翻译出来。而真正的技巧在于解释。古希腊的德尔菲的著名巫师以模棱两可而臭名昭著。当斯巴达人问，在波斯人攻击希腊时会发生什么，这个巫师回答：要么斯巴达会被消灭，要么其国王会被杀害。我想这些牧师盘算，如果这些最终都没有发生，则斯巴达人就会对阿波罗太阳神如此之感恩戴德，以至忽视其巫师做错预言的事实。事实上，国王在捍卫特莫皮拉隘道的一次拯救斯巴达并最终击败波斯人的行动中丧生了。

另一次事件，利迪亚的国王克罗修斯，这位世界上最富裕的人有一次问道：如果他侵略波斯的话会发生什么。其回答是：一个伟大的王国将会崩溃。克罗修斯以为这是指波斯帝国，殊不知正是他自己的王国要陷落，而他自己的下场是活活地在柴堆上受火刑。

近代的末日预言者为了避免尴尬，不为世界的末日设定日期。这些日期甚至使股票市场下泻。虽然它使我百思不解，为何世界的终结会使人愿意用股票来换钱，假定你在世界末日什么也带不走的话。

迄今为止，所有为世界末日设定的日期都无声无息地过去了。但是这些预言家经常为他们显然的失败找借口解释。例如，第七日回归的创建者威廉·米勒预言，耶稣的第二次到来会在1843年3月21日至1844年3月21日间发生。在没有发生这件事后，这个日期就修正为1844年10月22日。当这个日期通过又没有发生什么事后，又提出了一种新的解释。据说，1844年是第二次回归的开始，但是首先要数出获救者名单。只有数完了名单，审判日才降临到那些不列在名单上的人。幸运的是，数人名看来要花很长的时间。

当然，科学预言也许并不比那些巫师或预言家的预言更可靠。人们只要想到天气预报就可以了。但是在某些情形下，我们认为可以做可靠的预言。宇宙在非常大的尺度下的未来，便是其中一个例子。

我们在过去的300年间发现了在所有正常情形下制约物体的科学定律。我们仍然不知道在极端条件下制约物体的精确的定律。那些定律在理解宇宙如何起始方面很重要，但是它不影响宇宙的未来演化，除非直到宇宙坍缩成一种高密度的状态。事实上，我们必须花费大量金钱建造巨大粒子加速器去检验这些高能定律，便是这些定律对现在宇宙的影响是多么微不足道的一个标志。

即便我们知道了制约宇宙的有关定律，我们仍然不能利用它们去预言遥远的未来。这是因为物理方程的解会呈现出一种称作混沌的性质。这表明方程可能是不稳定的：在某一时刻对系统作非常微小的改变，系统的未来行为很快会变得完全不同。例如，如果你稍微改变一下你旋转轮盘赌的方式，就会改变出来的数字。你实际上不可能预言出来的数字；否则的话，物理学家就会在赌场发财。

在不稳定或混沌的系统中，一般地存在一个时间尺度，初始状态下的小改变在这个时间尺度将增长到两倍。在地球大气的情形下，这个时间尺度是5天的数量级，大约为空气绕地球吹一圈的时间。人们可以在5天之内作相当准确的天气预报，但是要做更长远得多的天气预报，就既需要大气现状的准确知识，又需要一种不可逾越的复杂计算。我们除了给出季度平均值以外，没有办法对6个月以后作具体的天气预报。

我们还知道制约化学和生物的基本定律，这样在原则上，我们应能确定大脑如何工作。但是制约大脑的方程几乎肯定具有混沌行为，初始态的非常小的改变会导致非常不同的结果。这样，尽管我们知道制约人类行为的方程，但实际上我们不能预言它。科学不能预言人类社会的未来或者甚至它有没有未来。其危险在于，我们毁坏或消灭环境的能力的增长比利用这种能力的智慧的增长快得太多了。

宇宙的其他地方对于地球上发生的任何事物根本不在乎。绕着太阳公转的行星的运动似乎最终会变成混沌，尽管其时间尺度很长。这表明随着时间流逝，任何预言的误差将越来越大。在一段时间之后，就不可能预言运动的细节。我们能相当地肯定，地球在相当长的时间内不会和金星相撞。但是我们不能肯定，在轨道上的微小扰动会不会积累起来，

引起在十几亿年后发生这种碰撞。太阳和其他恒星绕着银河系的运动，以及银河系绕着其局部星系团的运动也是混沌的。我们观测到，其他星系正离我们而去，而且离开我们越远，就离开得越快。这意味着我们周围的宇宙正在膨胀：不同星系间的距离随时间而增加。

我们观察到的从外空间来的微波辐射背景给出这种膨胀是平滑而非混沌的证据。你只要把你的电视调到一个空的频道就能实际观测到这个辐射。你在屏幕上看到的斑点的小部分是由太阳系外的微波引起的。这就是从微波炉得到的同类的辐射，但是要更微弱得多。它只能把食物加热到绝对温度的2.7度，所以不能用来温热你的外卖披萨。人们认为这种辐射是热的早期宇宙的残余。但是它最使人印象深刻的是，从任何方向来的辐射量几乎完全相同。宇宙背景探索者卫星已经非常精确地测量了这种辐射。从这些观测绘出的天空图可以显示辐射的不同温度。在不同方向上这些温度不同，但是差别非常微小，只有十万分之一。因为宇宙不是完全光滑的，存在诸如恒星、星系和星系团的局部无规性，所以从不同方向来的微波必然有些不同。但是，要和我们观测到的局部无规性相协调，微波背景的变化不可能再小了。微波背景在所有方向上能够相等到100000分之99999。

上古时代，人们以为地球是宇宙的中心。在任何方向上背景都一样的事实，对于他们而言毫不足怪。然而，从哥白尼时代开始，我们就被降级为绕着一颗非常平凡的恒星公转的一颗行星，而该恒星又是绕着不过是我们看得见的1000亿个星系中的一个典型星系的外边缘公转。我们现在是如此之谦和，我们不能声称任何在宇宙中的特殊地位。所以我们必须假定，在围绕任何其他星系的任何方向的背景也是相同的。这只有在如果宇宙的平均密度以及膨胀率处处相同时才有可能。平均密度或膨胀率的大区域的任何变化都会使微波背景在不同方向上不同。这表明，宇宙的行为在非常大尺度下是简单的，而不是混沌的。因此我们可以预言宇宙遥远的未来。

因为宇宙的膨胀是如此之均匀，所以人们可按照一个单独的数，即两个星系间的距离来描述它。现在这个距离在增大，但是人们预料不同星系之间的引力吸引正在降低这个膨胀率。如果宇宙的密度大于某个临界值，引力吸引将最终使膨胀停止并使宇宙开始重新收缩。宇宙就会坍缩到一个大挤压。这和起始宇宙的大爆炸相当相似。大挤压是被称作奇性的一个东西，是具有无限密度的状态，物理定律在这种状态下失效。

这就表明即便在大挤压之后存在事件，它们要发生什么也是不能预言的。但是若在事件之间不存在因果的连接，就没有合理的方法说一个事件发生于另一个事件之后。也许人们可以说，我们的宇宙在大挤压处终结，而任何发生在“之后”的事件都是另一个相分离的宇宙的部分。这有一点像是再投胎。如果有人声称一个新生的婴儿是和某一死者等同，如果该婴儿没从他的以前的生命遗传到任何特征或记忆，这种声称有什么意义呢？人们可以同样地讲，它是完全不同的个体。

如果宇宙的密度小于该临界值，它将不会坍缩，而会继续永远膨胀下去。其密度在一段时间后会变得如此之低，引力吸引对于减缓膨胀没有任何显著的效应。星系们会继续以恒常速度相互离开。

这样，对于宇宙的未来其关键问题在于：平均密度是多少？如果它比临界值小，宇宙就将永远膨胀。但是如果它比临界值大，宇宙就会坍缩，而时间本身就会在大挤压处终结。然而，我比其他的末日预言者更占便宜。即便宇宙将要坍缩，我也可以满怀信心地预言，它至少在100亿年内不会停止膨胀。我预料那时自己不会留在世上被证明是错的。

我们可以从观测来估计宇宙的平均密度。如果我们计算能看得见的恒星并把它们的质量相加，我们得到的密度不到临界值的百分之一左右。即使我们加上在宇宙中观测到的气体云的质量，它仍然只把总数加到临界值的百分之一。然而，我们知道，宇宙还应该包含所谓的暗物质，即我们不能直接观测到的东西。暗物质的一个证据来自于螺旋星系。这是些恒星和气体的巨大的饼状聚合体。我们观测到它们围绕着自己的中心旋转。但是如果它们只包含我们观测到的恒星和气体，则旋转速率就高到足以把它们甩开。必须存在某种看不见的物质形式，其引力吸引足以把这些旋转的星系牢牢抓住。

暗物质的另一个证据来自于星系团。我们观测到星系在整个空间中分布得不均匀；它们成团地集中在一起，其范围从几个星系直至几百万个星系。假定这些星系互相吸引成一组从而形成这些星系团。然而，我们可以测量这些星系团中的个别星系的运动速度。我们发现其速度是如此之高，要不是引力吸引把星系抓到一起，这些星系团就会飞散开去。所需要的质量比所有星系总质量都要大很多。这是在这种情形下估算的，即我们认为星系已具有在它们旋转时把自己抓在一起所需的质量。所以，在星系团中我们观测到的星系以外必须存在额外的暗物质。

人们可以对我们具有确定证据的那些星系和星系团中的暗物质的量作一个相当可靠的估算。但是这个估算值仍然只达到要使宇宙重新坍缩的临界质量的百分之十左右。这样，如果我们仅仅依据观测证据，则可预言宇宙会继续无限地膨胀下去。再过50亿年左右，太阳将耗尽它的核燃料。它会肿胀成一颗所谓的红巨星，直到它把地球和其他更邻近的行星都吞没。它最后会稳定成一颗只有几千英里尺度的白矮星。我正在预言世界的结局，但这还不是。这个预言还不至于使股票市场过于沮丧。眼下还有一两个更紧迫的问题。无论如何，假定在太阳爆炸的时刻，我们还没有把自己毁灭的话，我们应该已经掌握了恒星际旅行的技术。

在大约100亿年以后，宇宙中大多数恒星都已把燃料耗尽。大约具有太阳质量的恒星不是变成白矮星就是变成中子星，中子星比白矮星更小更紧致。具有更大质量的恒星会变成黑洞。黑洞还更小，并且具有强到使光线都不能逃逸的引力场。然而，这些残留物仍然继续绕着银河系中心每1亿年转一圈。这些残余物的相撞会使一些被抛到星系外面去。余下的会渐渐地在中心附近更近的轨道上稳定下来，并且最终会集中在一起，在星系的中心形成一颗巨大的黑洞。不管星系或星系团中的暗物质是什么，可以预料它们也会落进这些非常巨大的黑洞中去。

因此可以假定，星系或星系团中的大部分物体最后在黑洞里终结。然而，我在若干年以前发现，黑洞并不像被描绘的那样黑。量子力学的不确定性原理讲，粒子不可能同时具有很好确定的位置和很好确定的速度。粒子位置确定得越精确，则其速度就只能确定得越不精确，反之亦然。如果在一颗黑洞中有一颗粒子，它的位置在黑洞中被很好地确定，这意味着它的速度不能被精确地确定。所以粒子的速度就有可能超过光速，这就使得它能从黑洞逃逸出来，粒子和辐射就这么缓慢地从黑洞中泄漏出来。在一颗星系中心的巨大黑洞可有几百万英里的尺度。这样，在它之内的粒子的位置就具有很大的不确定性。因此，粒子速度的不确定性就很小，这表明一颗粒子要花非常长的时间才能逃离黑洞。但是它最终是要逃离的。在一个星系中心的巨大黑洞可能花10^{90}年的时间蒸发掉并完全消失，也就是1后面跟90个零。这比宇宙现在的年龄要长得多，它是10^{10}年，也就是1后面跟10个零。如果宇宙要永远膨胀下去的话，仍然有大量的时间可供黑洞蒸发。

永远膨胀下去的宇宙的未来相当乏味。但是一点也不能肯定宇宙是否会永远膨胀。我们只有大约为使宇宙坍缩所需密度的十分之一的确定

证据。然而，可能还有其他种类的暗物质，还未被我们探测到，它会使宇宙的平均密度达到或超过临界值。这种附加的暗物质必须位于星系或星系团之外。否则的话，我们就应觉察到了它对星系旋转或星系团中星系运动的效应。

为什么我们应该认为，也许存在足够的暗物质，使宇宙最终坍缩呢？为什么我们不能只相信我们已有确定证据的物质呢？其理由在于，哪怕宇宙现在只具有十分之一的临界密度，都需要不可思议地仔细选取初始的密度和膨胀率。如果在大爆炸后1秒钟宇宙的密度大了一万亿分之一，宇宙就会在十年后坍缩。另一方面，如果那时宇宙的密度小了同一个量，宇宙在大约10年后就基本上变成空无一物。

宇宙的初始密度为什么被这么仔细地选取呢？也许存在某种原因，使得宇宙必须刚好具有临界密度。看来可能存在两种解释。一种是所谓的人存原理，它可被重述如下：宇宙之所以是这种样子，是因为否则的话，我们就不会在这里观测它。其思想是，可能存在许多具有不同密度的不同宇宙。只有那些非常接近临界密度的能存活得足够久并包含足够形成恒星和行星的物质。只有在那些宇宙中才有智慧生物去诘问这样的问题：密度为什么这么接近于临界密度？如果这就是宇宙现在密度的解释，则没有理由去相信宇宙包含比我们已探测到的更多物质。十分之一的临界密度对于星系和恒星的形成已经足够。

然而，许多人不喜欢人存原理，因为它似乎太倚重于我们自身的存在。这样就有人对为何密度应这么接近于临界值寻求另外可能的解释。这种探索导致极早期宇宙的暴胀理论。其思想是宇宙的尺度曾经不断地加倍过，正如在遭受极端通货膨胀的国家每隔几个月价格就加倍一样。然而，宇宙的暴胀更迅猛更极端得多：在一个微小的暴胀中尺度成至少1000亿亿亿倍的增加，会使宇宙这么接近于准确的临界密度，以至于现在仍然非常接近于临界密度。这样，如果暴胀理论是正确的，宇宙就应包含足够的暗物质，使得密度达到临界值。这意味着，宇宙最终可能会坍缩，但是这个时间不会比迄今已经膨胀过的150亿年左右长太多。

如果暴胀理论是正确的，必须存在的额外暗物质会是什么呢？它似乎和构成恒星和行星的正常物质不同。我们可以计算出宇宙在大爆炸后的最初3分钟的极早期阶段产生的各种轻元素的量。这些轻元素的量依赖于宇宙中的正常物质的量而定。我们可以画一张图，在垂直方向标出轻元素的量，沿着水平轴是宇宙中正常物质的量。如果现在正常物质的

总量大约只为临界量的十分之一，则我们可以得到和观测很一致的丰度。这些计算也可能是错误的，但是我们对于几种不同的元素得出观测到的丰度这个事实，令人印象十分深刻。

如果存在暗物质的临界密度，那么其主要候选者可能是宇宙极早阶段的残余。基本粒子是一种可能性。存在几种假想的候选者，那是些我们认为也许存在但还没有实际探测到的粒子。但是最有希望的情形是中微子，我们对它已有很好的证据。它在过去被认为自身没有质量，但是最近一些观测暗示，中微子可能有小质量。如果这一点得到证实并发现具有恰好的数值，中微子就能提供足够的质量，使宇宙密度达到临界值。

黑洞是另一种可能性。早期宇宙可能经历过所谓的相变。水的沸腾和凝固便是相变的例子。在相变过程中原先均匀的媒质，譬如水，会发展出无规性。在水的情形下会是一大堆冰或蒸汽泡。这些无规性会坍缩形成黑洞。如果黑洞非常微小的话，它们由于早先描述的量子力学的不确定性原理的效应，迄今已被蒸发殆尽。但是，如果它们超过几十亿吨（一座山的质量），则现在仍在周围，并且很难被探测到。

对于在宇宙中均匀分布的暗物质，它对宇宙膨胀的效应是唯一探测其存在的方法。由测量遥远星系离开我们而去的速度便可确定膨胀的减慢程度。其关键在于，光离开这些星系向我们传播，所以我们是在观测在遥远的过去的这些星系。人们可以绘一张图，把星系的速度和它们的表观亮度或星等做比较，星等是它们离开我们的距离的测度。这张图上的不同曲线对应于不同的膨胀减慢率。向上弯折的曲线对应于将要坍缩的宇宙。初看起来观测似乎表示坍缩的情景。但是麻烦在于，星系的表观亮度不能很好地标度离开我们的距离。不仅在星系的本征亮度存在相当大的变化，而且还有证据说明其亮度随时间而改变。由于我们不知道允许的亮度演化是多少，所以我们还不能说减慢率是多少；它是否快到使宇宙最终坍缩，或者宇宙会继续永远膨胀下去。这必须等到我们发展出更好的测量星系距离的手段后才行。但是我们可以肯定，减慢率没有快到使宇宙在今后的几十亿年内坍缩的程度。

宇宙在1000亿年左右既不永远膨胀也不坍缩是一个非常激动人心的前景。我们是否有所作为使将来变得更加有趣呢？一种肯定可为的做法是让我们驶到一颗黑洞中去。它必须是一颗相当大的黑洞，比太阳质量的一百万倍还要大。在银河系的中心很可能有颗这么大的黑洞。

在一颗黑洞中会发生什么我们还不很清楚。广义相对论的方程允许这样的解，它允许人们进入一颗黑洞并从其他地方的一颗白洞里出来。白洞是黑洞的时间反演。它是一种东西只出不进的物体。在宇宙的其他部分可能会有白洞。这似乎为星系际的快速旅行提供了可能性。麻烦在于这种旅行也许是过于迅速了。如果通过黑洞的旅行成为可能，则似乎无法阻拦你在出发之前已经返回。那时你可以做一些事，譬如杀死你的母亲，因为她一开始就不让你进入黑洞。

看来物理定律不允许这种时间旅行，这也许对于我们（以及我们的母亲们）的存活是个幸事。似乎有一种时序防御机构，不允许旅行到以前去，使得这个世界对于历史学家是安全的。如果一个人向以前旅行，似乎要发生的是，不确定性原理的效应会在那里产生大量的辐射。这种辐射要么把时空卷曲得如此之甚，以至于不可能在时间中倒退回去，要么使时空在类似于大爆炸和大挤压的奇性处终结。不管哪种情形，我们的过去都不会受到居心叵测之徒的威胁。最近我和其他一些人进行的一些计算支持这个时序防御假设。但是，我们过去不能将来永远也不能进行时间旅行的最好证据是，我们从未遭受到从未来来的游客的侵犯。

现在小结如下：科学家相信宇宙受定义很好的定律制约，这些定律在原则上允许人们去预言将来。但是定律给出的运动通常是混沌的。这意味着初始状态的微小变化会导致后续行为的快速增大的改变。这样，人们在实际上经常只能对未来相当短的时间做准确的预言。然而，宇宙大尺度的行为似乎是简单的，而不是混沌的。所以，人们可以预言，宇宙将永远膨胀下去呢，还是最终将会坍缩。这要按照宇宙的现有密度而定。事实上，现在密度似乎非常接近于把坍缩和无限膨胀区分开来的临界密度。如果暴胀理论是正确的，则宇宙实际上是处在刀锋上。所以我正是继承那些巫师或预言者的良好传统，两方下赌注，以保万无一失。

第14章　《荒岛唱片》访谈记

英国广播公司的《荒岛唱片》节目从1942年就开始广播，是无线电中延续最久的节目。现在，它多少已成为英国的传统。历来访谈者的范围极为广泛。它访谈了作家、演员、音乐家、电影演员和导演、运动明星、喜剧演员、厨艺家、园丁、教师、舞蹈家、政治家、皇室成员、漫画家以及科学家。访客被称作落难者，假定他们被弃绝到一座荒岛之上，让他们选取八张随身携带的唱片。还允许他们随带一种奢侈品（必须是无生命的）以及一本书（假定一本适当的宗教的书——《圣经》《可兰经》或其他类似的已经放在那儿，还有《莎士比亚全集》）。唱机是理所当然地提供的。早先的宣布通常还说：“……那里有一台留声机并有用之不竭的唱针。”现在用太阳能光碟唱机作为听唱片的手段。

该节目每周播一次，访客选取的唱片在访谈时同步放出，全过程通常为40分钟。然而，这次和史蒂芬·霍金的访谈是一次例外，它在1992年的圣诞节播出，延续的时间更长。

访问者为苏·洛雷。

苏：当然，史蒂芬，你在许多方面已经非常熟悉荒岛的寂寞，脱离了正常的身体动作以及被剥夺了自然的交流手段。你有多孤单？

史：我认为自己没有脱离正常生活，我以为周围的人也不这么认为。我不觉得自己是个残疾人，只不过我的运动神经细胞不能运作罢了，不如讲我仿佛是个色盲的人。我想我的生活几乎谈不上是寻常的，但是我觉得精神上是正常的。

苏：尽管如此，你已经向自己证明了，不像《荒岛唱片》上的多数落难者那样，你在精神和智慧上是自足的。你的理论和灵感足以使自己忙碌不停。

史：我觉得自己天性有点害羞，而且我交流的困难迫使我依赖自己。但是小时候我是个多话的孩子。我需要和他人讨论来激励自己。我觉得向他人描述自己的思想对我的研究大有助益。即便他们没有提供任何建议，仅仅组织我的思想使他人理解，就时时将我引向新的方向。

苏：但是，史蒂芬，你情感上如何得到满足呢？即便是杰出的物理学家也必须从他人处得到这些啊！

史：物理学尽管美妙，却是冷冰冰的。如果我除了物理学外一无所有，则无法活下去。正如所有人那样，我需要温馨和爱情。还有，我是非常幸运的，比许多患相同病的人幸运得多，我受到大量的关爱。音乐也是我生活中的重要部分。

苏：请告诉我，是物理学还是音乐带给你更多的快乐？

史：我要说，我把物理学问题全部澄清后获得快乐的强度，是音乐从未曾带给我的。但那是一个人生涯中可遇不可求的现象，而你想听音乐时只要把光碟放在唱机上即可。

苏：请告诉我你在荒岛上首先要听的唱片。

史：那是帕伦克的《格罗里亚》[22]。去年夏天在科罗拉多的阿斯平我第一次听到它。阿斯平主要是滑雪胜地，夏天时常开物理会议。紧靠物理中心是一个巨大的帐篷，那里正举行着音乐节。当你坐在那里研究黑洞蒸发会发生什么问题时，你能同时听到预演。这是非常理想的，因为它把我的两个主要快乐——物理和音乐结合在一起了。如果我在荒岛中兼有两者，根本不想被拯救。那是说，直到我在理论物理中做出要告诉所有人的新发现为止。我设想拥有一个卫星碟，以便通过电子信箱得到物理论文应是违反规定的。

苏：无线电可以掩盖身体上的缺陷，但是在这种情形下把别的东西也掩饰了。史蒂芬，回顾7年以前你完全失声了。能告诉我这个过程吗？

史：1985年的夏天，我在日内瓦的欧洲核子中心，那是一座巨大的粒子加速器。我打算继续往德国的贝洛伊斯去听瓦格纳的《尼伯龙根的指环》的歌剧系列。可惜我得了肺炎，并被送到医院急诊。日内瓦的医院告知我妻子说我没有希望了，可以撤走生命维持系统。但是她根本不同意。我被用飞机送回到剑桥的爱登布鲁克斯医院。那里的一位名叫罗杰·格雷的外科医生为我进行了穿气管手术。这个手术救了我一命，却从此使我失声。

苏：但是，那时无论如何你的讲话已经很模糊并很难听明白，所以

最终总要失去讲话能力的，是吗？

史：尽管我的声音不清楚并很难理解，但是和我接近的人仍能理解。我可以通过翻译来做学术报告，我还可以对人口授论文。但在做完手术之际，我觉得受到了损害。我觉得如果我不能恢复声音，那就不值得做手术。

苏：后来加利福尼亚的电脑专家得知你的境况，而且给你一种声音。你觉得如何？

史：他名叫瓦特·沃尔托兹。他的岳母和我的境况相同，所以他发展了一种电脑程序帮助她交流。一个指示光点在屏幕上移动。当它停留在你所需要选取的词上时，你就用头或眼睛的动作来操作开关，在我的情形下是用手。人们用这种办法可在屏幕下半部打印出的词中作选择。当他积累够了他所要说的，便可以送进语言合成器或者存在磁盘中。

苏：但是这进行得很慢。

史：它是很慢，粗略地讲为正常讲话速度的十分之一。但是语言合成器比我原先的语言清楚了很多。英国人说它具有美国的口音，而美国人却说它是斯堪的纳维亚或爱尔兰口音。不管怎么说，也不管是什么口音，每个人都能明白了。在我的自然声音恶化时，我的大儿子能调整适应之，可是我最小的儿子在我动穿气管手术时才6岁，在这之前他从来就听不懂。他现在没有困难了。这对我而言也是件大事。

苏：这也意味着，你对于任何访问者的问题都要早早得到预先通知，而且只需要回答你准备妥当的，是吗？

史：对于像这次这样长的预录的节目，提早把问题交给我会有助益，这样可以避免花费大量时间来录音。在某一方面也使我易于掌握。但是我宁愿即席回答问题。我在学术或通俗讲演之后就是这么做的。

苏：但是正如你所说的，这个过程表明你有主动权，我知道这对你相当重要。你的亲友有时称你为顽固或霸气的，你服气吗？

史：有主见的人时常被叫做顽固。我宁愿说自己是决断的。如果我不相当决断，今天就不会在此。

苏：你一贯如此吗？

史：我只要和其他人一样地对自己的生活有同等程度的控制权。残疾人的生活受他人控制的情形实在太多了。没有一个正常人能忍受这个。

苏：请告诉我你的第二张唱片。

史：勃拉姆斯的小提琴协奏曲。这是我买的第一张大唱片。那是1957年，每分钟33转的唱片刚开始在英国出售。如果我买一台唱机则会被父亲责备为不顾他人的自私。但是我说服他我可以买到便宜的零件组装一台。他赞赏这种节俭的做法。我把唱盘和放大器放在一台老的78转的唱机盒子里。如果我保存它的话，现在它就会变得非常珍贵。

这台唱机制成后，我需要放唱片。一位中学时的朋友建议放勃拉姆斯的小提琴协奏曲，因为我们的学校圈子里谁也没有这种唱片。我记得为它花费了35先令，这在当时尤其对我而言算是一大笔钱。唱片的标价变贵了，但实质上比过去便宜得多。

当我在店里首次听这张唱片时，觉得有点儿奇怪，我不清楚我是否会喜爱它，但是我感到我应该说我喜爱它。然而，多年来它变得对我很重要。我愿意听慢乐章的起始部分。

苏：你家的一个老友说过，在你童年时，你的家庭是，我引用他的话说，是："高度智慧，非常聪明而且非常怪异的。"回顾过去，你是否认为这个描述大致不差？

史：对我的家庭是否智慧我不便评论，但是我们肯定不自认为是怪异的。然而，我想按照圣阿尔班斯的标准也许显得如此。我们在那里住时，那是个相当严肃的地方。

苏：而你的父亲是位热带病专家。

史：我父亲从事热带医学研究。他经常去非洲，在这个领域试验新的药物。

苏：那么你的母亲对你的影响更大，如果是这样的话，那是什么样的影响？

史：不，我要说我的父亲影响更大些。我模仿他。因为他是一位科学研究者，我觉得长大后从事科学研究是很自然的事情。仅有的差别是

我对医学或生物学毫无兴趣，因为这些学科似乎过于不精确和描述性。我要某些更基本的东西，在物理学中可以找到这些。

苏：你母亲说过，你一贯具有她描述的强烈的好奇心。她说过："我能看到星星使他痴迷。"你是否记得？

史：我记得有一次深夜从伦敦回家。那时候为了省钱把路灯都关了。我从未看见过这么美丽的银河横贯夜空。在我的荒岛中不会有任何街灯，所以可以尽情欣赏夜空。

苏：你的童年无疑是非常聪明的，在家里和你姐妹做游戏时非常富有进取心，但是在学校里却会落到班级里最差的，而且满不在乎，这是真的吗？

史：这是我在圣阿尔班斯第一年的情形。但是我必须说，这是一个尖子班，我的考试比我的作业好得多。我知道我可以做得很好——那只不过是我的书写和不整洁把我的分数拉到这么低。

苏：第三张唱片？

史：我在牛津读本科时，读过阿尔多斯·赫胥黎的《对位》。[23]这是描绘本世纪30年代的书，书中有大量的人物。除了一个人物是有血有肉的以外，绝大多数人物都是形式化的。这个人显然是赫胥黎本人的写照。他杀死了英国法西斯的头目，这个头目是按照奥斯瓦尔德·莫斯利爵士塑造的。然后他告诉法西斯党徒他干了此事，并把贝多芬的弦乐四重奏第132号唱片放在留声机上。他在放第三乐章的中间听到了敲门声，开门时被法西斯党徒枪杀。

这是一部非常差劲的小说，但是赫胥黎的唱片选对了。如果我得知潮汐正逼近，并将淹没我的荒岛，就会去听这四重奏的第三乐章。

苏：你上牛津的大学学院读数学和物理，按照你计算的，在那儿你平均每天大约用功一小时。按照我读过的，你划船、喝啤酒还以捉弄他人为乐。是什么原因使你对学业不在乎？

史：那是50年代末期，大多数年轻人对所谓的成就感到幻灭。除了财富还是财富，似乎没有别的什么可以追求。保守党刚刚赢得第三次竞选，其口号为"你从未这么好过"。我和我的大多数同时代人厌倦生活。

苏：尽管如此，你仍然在几小时内解决你的同学在几周不能完成的问题。从他们所说的，他们显然知道你的才能。你认为自己意识到了吗？

史：牛津大学那个时期的物理课程极其简单。人们可以不听任何课，一周只要接受一两次辅导就能通过。你不必记许多事实，只要记住一些方程即可。

苏：正是在牛津，你首次注意到手脚不怎么听使唤了。那时候你怎么自我解释这个现象的？

史：事实上，我注意到的第一件事，是我不能正常地划船。后来我在从初级公共教室出来的楼梯上摔了一大跤。我忧虑头脑也许受到损害，所以看了学院医生，但是他认为没问题并让我少喝啤酒。我在牛津的期终考后去波斯度暑假。我的身体在回来之后一定是虚弱了不少。但是我把起因归结于所经历的一场严重的胃病。

苏：什么时候你开始屈服，承认患了非常严重的病，并且决定听取医生的劝告？

史：那时我已在剑桥，圣诞节时回家。那是1962年到1963年的非常寒冷的冬天。尽管我自知对滑冰不在行，仍然顺从母亲去圣阿尔班斯的湖面滑冰。我摔倒后要爬起来非常艰难。我母亲感到出了什么毛病。她带我去看家庭医生。

苏：然后在医院住了三周，而他们告诉了你最坏的情形？

史：事实上是在伦敦的巴兹医院，因为我父亲是属于巴兹的。我住院两周，做了检查。但是他们除了说不是多发性硬化并且不是典型病以外，实际上从未告诉我出了什么毛病。他们没有告诉我前景如何，但我猜出非常糟糕，所以也不想去问。

苏：而且最后他们通知你说只有两年多的时间可活。史蒂芬，让我们暂时停顿一下，你可以挑选下一张唱片。

史：瓦尔基莉的第一场。这是美尔基尔[24]和列曼[25]演唱的另一张早期的大唱片。它是在战前原先录在78转的唱片上面，而在60年代被转录到大唱片上。1963年我被诊断得了运动神经细胞病之后，就变成喜欢

瓦格纳的作品，因为他和我的末日黑暗的情绪相投。我的语言合成器可惜未受过良好教育，把他的名字发成软的W的音。我必须把他拼写成V—A—R—G—N—E—R才使之听起来差不离。

《指环》系列的四部歌剧是瓦格纳最伟大的作品。1964年我和我的妹妹费利珀一起去德国的贝洛伊斯去看这些歌剧。那时我对《指环》尚不熟悉，所以系列的第二部《瓦尔基莉》给我留下了极其深刻的印象。这是沃尔夫冈·瓦格纳执行制作的，舞台几乎是全暗的。这是一对孩提时代即分开的双生子西格蒙德和西格林德的爱情故事。他们再次邂逅的场合是西格蒙德在西格林德的丈夫，也就是西格蒙德的敌人洪丁的家中避难之际。我选取的片断是西格林德叙述她被迫和洪丁举行婚礼的故事。一位老人在庆祝会之际进入大厅。此时乐队奏起忠烈祠的旋律，这是《指环》中的最高贵的主旋律。因为他是渥当，是群神之首也是西格蒙德和西格林德的父亲。他把剑插入树干之中。这把剑是要传给西格蒙德的。在该幕结尾时西格蒙德把它拔出来，然后两个人跑到树林中去。

苏：史蒂芬，从你的生平得知，通知你只能再活两年多的几乎是死刑的裁决使你清醒过来，也可以说使你更专注于生命。

史：其首先的影响是使我沮丧。病情似乎恶化得相当迅速。因为我觉得活不到结束我的博士论文，所以没有必要做任何事或攻读博士。后来病情得到缓解，我也开始在研究上有所进展，尤其是能够证明，宇宙在大爆炸处必须有个开端。

苏：你在一次访谈中甚至说过，你自认为现在比患病之前更快乐。

史：我现在肯定是更快乐。在患运动神经细胞病之前，我已对生活厌倦了。但是夭折的前景使我意识到生命的可贵。一个人有这么多事可做，每一个人都有这么多事可做。我得到一种真正的成就感，尽管我生病了，我对人类知识做出了适度的却是有意义的贡献。当然，我是幸运的，但是任何人只要足够努力都能有所成就。

苏：你是否可以引申到这种程度，说如果你没有得运动神经细胞病，你就不会得到今天所有的成就，或者这个问题过于简单化了？

史：不，我认为运动神经细胞病对任何人都没有好处。因为我是要理解宇宙如何运行，这种病无法阻止我的意愿，所以对我的损害比他人小一些。

苏：当你开始面对疾病时，一位名叫简·王尔德的女士给予你以鼓励。你在一次酒会上和她邂逅，然后恋爱直至结婚。你愿意说，你的成功中的多少应归功于她，归功于简？

史：如果没有她我肯定不能成功。和她订婚使我从绝望的深渊中拔出来。而且如果我们要结婚，我必须有工作，这样我就必须完成我的博士论文。我开始努力学习并且发现喜欢这样。随着我的病况恶化，简一个人照顾我。在那个阶段没有人愿意帮助我们，而且我们肯定没有钱回报帮助。

苏：而且你们一道蔑视医生，不仅是因为继续生活下去，而且还生育了子女。你们在1967年得到罗伯特，1970年得到露西，然后在1979年得到提莫西。医生们是如何受到震惊的？

史：事实上，诊断我的医生再也不愿管我了。他觉得这是不治之症，首次诊断后我再也没去看他。我父亲在实际上成为我的医生，我听从他的建议。他告诉我，没有证据表明这种病是遗传的。简设法照顾我和两个孩子。只有在1974年我们去加利福尼亚时需要外人的帮助，起先是一名学生，后来是护士和我们同住。

苏：但是现在你不再和简在一起了。

史：我动了穿气管手术后需要24小时的护理。这使得婚姻关系越来越紧张。最后我搬出去，现在住在剑桥的一套新公寓里。现在我们分居。

苏：再回到音乐上来。

史：我挑选披头士的《请你让我快乐》。在我挑了4张相当严肃的唱片之后，需要一些轻松的解脱。对于我本人和许许多多其他的人而言，披头士的问世正值其时，这是对陈腐的令人作呕的流行乐坛吹进的大受欢迎的清新气息。我通常在星期日晚上收听卢森堡电台的20首最好的歌曲。

苏：尽管你得到无数的荣誉，史蒂芬·霍金——我特别要提到你是剑桥的卢卡斯数学教授，这是艾萨克·牛顿的教席——你决定写一部有关你的研究的通俗著作，我想其理由非常简单，那就是你需要钱。

史：我想从一部通俗书可适度地赚一些钱，我写《时间简史》的主要原因是我喜欢它。我为过去25年所做的发现激动不已，我要跟大家分享。我从未预料到能进行得这么成功。

苏：的确，它打破了所有纪录，并因为其荣登畅销书榜的时间之久而被列入《吉尼斯世界纪录》，现在它仍在榜上。似乎没人知道它在世界范围究竟出售了多少本，但是肯定超过了1000万本。显而易见，人们购买它，但一直想问的问题是：他们阅读吗？

史：我知道伯纳德·列文看到第29页就看不下去了，但是我知道许多人阅读得更多。在世界各地，人们到我面前告诉说，他们如何地欣赏这部书。他们也许没有看完或者不能理解其中的全部细节。但是，他们至少得到这种观念，我们生活在由合理的定律制约的宇宙中，而且我们能够发现和理解这些定律。

苏：正是黑洞的概念深蒙公众想像力的宠爱，从而刺激了探究宇宙学的兴趣。你看过《星球旅行》的所有系列吗？“勇敢地探险前人从未涉足之处”，等等。如果你看过的话，你喜欢它吗？

史：我在十几岁时读了许多科学幻想的书。而现在我自己在这领域里作研究，我觉得大多数科幻小说都有点过于轻而易举。如果你不必把在超空间行驶或光束载人描绘成一幅和谐图像的一部分的话，把它们写进科幻小说实在是举手之劳的事。真正的科学是实实在在发生的事，所以也就更加激动人心。科学幻想作家从未在科学家思考到黑洞之前提示过它。我们现在对许多黑洞有了相当有力的证据。

苏：如果你落进黑洞的话会经受到什么惊险？

史：任何涉足科幻小说的读者都知道，你落入黑洞会发生什么。你会变成意大利面条。但是，黑洞不是完全黑的这一点是更加有趣得多。它们以恒定的速率发射出粒子和辐射。这使黑洞缓慢地蒸发，但是黑洞和它的内容最终会发生什么仍然不很清楚。这是一个激动人心的研究领域，而科学幻想作家还未跟上来。

苏：而你所提到的辐射当然是霍金辐射。你并没有发明黑洞，尽管你进一步证明了黑洞不是黑的。正是他们的发现刺激你开始更认真地思考宇宙的起源，是这样的吗？

史：恒星坍缩形成黑洞在许多方面像是宇宙膨胀的时间反演。一颗恒星从较低密度的状态坍缩成非常紧致的状态，而宇宙是从非常紧致状态膨胀到较低密度的状态。存在一个重要的差别：我们处于黑洞之外，但却在宇宙之中。可是两者都以热辐射为表征。

苏：你说黑洞和它的内容最终会发生什么仍然不很清楚。但是我以为在理论上，不管发生了什么，而且包括航天员在内，不管什么进入黑洞而消失，最终都会以霍金辐射的形式而被再循环。

史：航天员的质量能量将会变成黑洞发出的辐射而被再循环。但是航天员本人，甚至构成他的粒子不会从黑洞出来。现在的问题是，他们究竟发生了什么？他们是被毁灭了呢，还是穿越到另一个宇宙中去？这是我极想知道的某种东西，而我并不想跳到一颗黑洞中去。

苏：史蒂芬，你是否依赖直觉做研究，也就是说，用直觉得到你喜爱并令你着迷的理论，然后再着手证明之？或者说，作为一名科学家，你是否总是要以逻辑方式导致结论，而不敢预先作猜测？

史：我大量依赖直觉，我试图猜出一个结果，但是之后必须证明之。而在这一阶段，我时常发现，我想过的东西不是真的，或者出现某种从未预料到的其他情形。我就是这样发现黑洞不是完全黑的。那时我想证明一些别的东西。

苏：再回到音乐上来。

史：莫扎特是我喜爱的一位音乐家。他写下了无数的作品。今年年初我50岁的生日之际，我收到一套他的全集的光碟，超过200小时长。我没听完，正继续着。《安魂曲》是他最伟大的作品之一。莫扎特在完成《安魂曲》之前死去，他的一位学生从莫扎特余下的片断将其完成。我们就要听的《赞美诗》是仅有的全部由莫扎特谱写并作管弦乐的部分。

苏：史蒂芬，请原谅我把你的理论过于简化。你一度相信过，正如我所理解的，曾经存在过创生的一点，即大爆炸，但是你现在不再这么认为了。你相信既没有开端也没有终结，而且宇宙是自足的。这是否表明，并不存在创生的行为，因此也就没有上帝的存身之处。

史：是的，你是过于简化了。我仍然相信宇宙在实时间里在大爆炸

之处有一个开端。但是存在另外一种时间，即虚时间，它是和实时间垂直的。宇宙在虚时间里既没有开端也没有终结。这就表明宇宙起始的方式是由物理定律所确定的。人们也就不必说，上帝为宇宙运行选择某种我们不能理解的任意方式。我的理论并没有说上帝存在与否——只不过说祂不是任意的。

苏：但是，如果上帝可能不存在的话，你何以解释所有那些在科学以外的东西：人们过去以及现在对你的，实际上是对你自身灵感的热爱和信任？

史：热爱、信任和道德属于和物理学不同的范畴。你不能从物理定律推导出人们应如何行为。但是人们可以希望，物理和数学涉及的逻辑思维也会指导人们的道德行为。

苏：但是我认为，许多人觉得你实际上已经摆脱了上帝。你想否认这一点吗？

史：我的研究只不过指出，你不必说宇宙起始的方式是上帝的一个念头。但是你还遗留一个问题：为什么宇宙要在乎自身之存在？如果你愿意的话，可把上帝定义为这个问题的答案。

苏：让我们听第七张唱片。

史：我非常喜欢歌剧。我曾动过念头，八张唱片全选歌剧。其范围从格鲁克和莫扎特起，通过瓦格纳，直到威尔第和普契尼。但是我最后把它减少到两张。一张必须是瓦格纳，另一张我最后决定应属于普契尼。《图兰朵》是他最伟大的歌剧，但是又是他生前未能完成的。我选取的片段是图兰朵叙述古代中国的一名公主如何被蒙古人强奸并抢掳的经过。为了对此报复，图兰朵打算向她的求婚者问三个问题。他们如果回答不出就会被处死。

苏：圣诞节对你有什么意义？

史：它有点像美国的感恩节。是一个全家团聚以及感谢过去一年的场合。又是展望新年的时刻，正如在马厩中诞生的一个孩子所象征的。

苏：让我们更物质化一些，你想要什么礼物——也许近来你已富足到拥有一切？

史：我宁愿要惊奇。如果要求某种特定的东西，他就没有给施者留下利用他或她想象的自由或机会。但是我不介意让人知道我喜爱夹心巧克力。

苏：史蒂芬，迄今你已比预料的多活了30年。尽管人们告诉你说永远不会生育，你却当了父亲，你完成了畅销书，你改变了人们头脑中的空间和时间的陈旧信仰。在你有生之年还要计划做什么呢？

史：所有这一切之所以可能只是因为我足够幸运地得到大量帮助。我对自己所取得的一切感到高兴，但是在我死之前还有许多想做的事。我不愿讲我的私生活，但在科学上我想知道人们应如何用量子力学把引力和其他的自然力统一在一起。我尤其想知道黑洞蒸发时会发生什么。苏：现在放最后一张唱片。

史：我要请你发这个音。我的语言合成器是美文的，对于法文无能为力。这是依狄斯·皮阿芙[26]唱的《我不再为任何事后悔》。这刚好可用以总结我的一生。

苏：史蒂芬，现在如果你只能带走一张唱片，你要选哪一张？

史：那应是莫扎特的《安魂曲》。我可以一直把它听到光碟随身听的电池用完为止。

苏：还有你想带去的那本书呢？当然，《莎士比亚全集》和《圣经》已经预先放在那儿供你翻阅。

史：我想我要带乔治·爱略特[27]的《中途》。我记得有人，也许是维吉尼亚·伍尔芙[28]说过，这是一部为成熟的人写的书。我不清楚自己是否合格，但不妨一试。

苏：还有你的奢侈品呢？

史：我想要大量的剑桥奶酪，对我来说，它是我的奢侈品的缩影。

苏：那么不是夹心巧克力，而是大量的剑桥奶酪。史蒂芬·霍金博士，非常谢谢你让我聆听你的荒岛唱片，谨祝圣诞快乐。

史：感谢你挑选我。我从荒岛衷心祝愿你圣诞快乐。我敢打赌说我的天气比你的还更加怡人。

[1]这篇和下一篇文章是基于1987年9月在苏黎世国际运动神经细胞病学学会的发言，并合并了1991年8月写的材料。

[2]这是1987年10月在伯明翰召开的英国运动神经细胞病协会会议上的发言稿。

[3]这是1989年10月在西班牙奥维多接受阿斯特里乌斯王子协和奖金时的讲演。此文做过修订。

[4]此文原载于1988年12月的《独立报》上。《时间简史》荣登《纽约时报》最畅销书榜达53周之久；在英国直至1993年2月止已列名伦敦的《星期日泰晤士报》的最畅销书榜达205周之久。（184周后，由于在这个榜上出尽风头而被收入《吉尼斯世界纪录》。）现在已被翻译成33种文字。

[5]杰弗里·阿歇尔（Jeffrey Archer）是美国当代悬念通俗小说家。

[6]雅各布·布朗诺夫斯基（Jacob Bronowski）是英国当代人类学家。——译者注

[7]截至1993年4月，在美国出了精装的第40次和平装的第19次印刷，而在英国是精装的第39次印刷。

[8]1992年5月在剑桥凯尔斯学院的讲演。

[9]1980年4月29日我在剑桥就职为卢卡斯数学教授。这篇文章即我的就职讲演，由我的一名学生宣读。

[10]事实上，1983年人们在日内瓦的欧洲核子中心观测到W和Z粒子。1984年另一次诺贝尔奖颁给了卡罗·鲁比亚和西蒙·范德·米尔，他们领导的小组做出了这个发现。只有特符夫特失去了得奖机会。

[11]潘格洛斯（Pangloss）是伏尔泰小说《赣第德》中的人物，他是一名乐观主义的哲学家，经常使赣第德陷入困难境地。他的名言为："我们生活在所有可以允许的最好的世界中。"伏尔泰用他来影射卢梭。——译者注

[12]超引力理论似乎是具有性质1，2和3的唯一的粒子理论。但是在写完这篇文章后，人们把大量兴趣投注于所谓的超弦理论。像弦的小圈的广延的物体而非点粒子是这些理论的基本对象。它的思想是，我们觉得是粒子的东西实际上是圈上的一个振动。这些超弦理论似乎在低能极限下归结为超引力，但是从超弦理论抽取在实验上可检验的预言迄今只得到很少的成功。

[13]这是1991年7月在东京日本电话电报资讯交流系统公司的模式会议上的讲演。

[14]1987年6月在剑桥举行的为纪念牛顿《原理》出版300周年的"引力300年"会议上的讲演。

[15]1977年1月发表在《科学美国人》上。

[16]蒲鲁斯特（Marcel Proust）是法国19世纪和20世纪之交的小说家。——译者注

[17]这是1988年4月在伯克莱的加利福尼亚大学的希奇科克的讲演。

[18]这是1990年4月在剑桥大学西格玛俱乐部的讲演。

[19]西尼德·奥柯诺（Sinead O'connor）是英国通俗歌星。——译者注

[20]麦当娜（Madonna）是美国通俗歌星。——译者注

[21]1991年1月在剑桥大学的达尔文讲演。

[22]帕伦克（Poulenc）是法国20世纪初作曲家。《格罗里亚》（*Gloria*）通常在做弥撒时演奏。——译者注

[23]阿尔多斯·赫胥黎（Aldous　Huxley）（1894—1963）是进化论者托马斯·赫胥黎之孙，英国小说家。《对位》（*Point Counterpoint*）是他1928年发表的乌托邦式的实验小说。——译者注

[24]美尔基尔（Laurity Melchior）是丹麦20世纪男歌唱家。——译者注

[25]列曼（Lotte Lehmann）是德国20世纪女歌唱家。——译者注

[26]依狄斯·皮阿芙（Edith Piaf）是法国20世纪女歌唱家，被誉为法国的麻雀。——译者注

[27]乔治·爱略特（George　Eliot）是英国19世纪女小说家。《中途》（*Middlemarch*）是她的一部杰作。——译者注

[28]维吉尼亚·伍尔芙（Virginia Woolf）是英国20世纪女小说家。——译者注

BBC Radio 4　The Reith Lectures　BBC

00:26:20

Do Black Holes Have No Hair?　Tue 26 Jan 2016 21:30

黑洞没有毛吗？

00:27:38

Black Holes Ain't As Black As They Are Painted　Tue 2 Feb 2016 21:30

黑洞并不像想象的那么黑

Black Holes
The BBC Reith Lecture
黑洞不是黑的
霍金BBC里斯讲演

[英] 史蒂芬·霍金 著　吴忠超 译
[英] 大卫·舒克曼 导读

英国 BBC 广播公司里斯讲座，
史蒂芬·霍金发布黑洞的最新研究成果！
BBC 新闻科学编辑大卫·舒克曼导读

这位传奇物理学家断言，
只要能理解黑洞以及它们如何挑战时空的本性，
我们就会更接近揭开宇宙的奥秘。

"有人说，事实有时比小说更奇妙，没有什么比黑洞的情形更体现这点了。黑洞比科幻作家的任何异想天开都更怪异。"

特别收录 ———— 霍金年表 &《黑洞极简史》| 吴忠超

湖南科学技术出版社

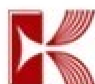
版权信息

黑洞不是黑的：霍金BBC里斯讲演

作者：（英）史蒂芬·霍金

译者：吴忠超

ISBN：9787535792488



湖南科学技术出版社
HUNAN SCIENCE & TECHNOLOGY PRESS

目录

版权信息
导言|大卫·舒克曼
黑洞没有毛吗？
黑洞并不像想象的那么黑
黑洞上的软毛
附录 黑洞极简史
史蒂芬·霍金年表
史蒂芬·霍金睿语

智慧是随机应变的能力。

——

Stephen Hawking

我相信上帝不存在是最简单的解释。

没有东西创生了宇宙，

也没有任何东西掌握我们的命运。

这导致我深切地意识到，

也许不存在天堂，也没有来世。

我们拥有此生以鉴赏宇宙的大设计，

对此我极度感恩。

——

Stephen Hawking

首先，要志向远大，而非目光短浅。

第二，永不言弃。

工作赋予你意义和目标。

没有它生命变成空虚。

第三，如果你非常幸运地找到爱，

守住它，千万不要将它抛弃。

——

Stephen Hawking

导言|大卫·舒克曼

有关史蒂芬·霍金的一切都是迷人的：他在绝境中的病体下深藏的天才；他那只有一块肌肉活动的脸上露出的意味深长的微笑；还有他那机器人的声音，这种特别的声音邀请大家分享他的发现的快乐，与他的思想一同去漫游宇宙最奇异的角落。

这位非凡的人物克服千难万险，超越了寻常的科学边界。他的著作《时间简史》影响惊人，售出了超过1000万册。从他本人出演流行喜剧中的角色，到白宫对他的邀请以及广受欢迎的霍金传记片，都肯定了他的名望。霍金已经名副其实地成为了世界上最著名的科学家。

20世纪60年代，当他被诊断患了运动神经元病时，医生断言他只有两年的寿命了。但半个多世纪后，他仍然在研究、写作、旅行，并且还经常在新闻媒体上露面。他的女儿露西用“极度倔强”来解释他这种异常的活力。

不管是由于个人遭受的痛苦，还是由于他的热情，霍金都令人浮想联翩。他最近告诫人们，人类正面临着一系列自己制造的灾难——从全球温化到人工改造的病毒——一篇报道他的这些观点的文章获得了那天BBC网站上最多的点击量。

极其讽刺的是，如此杰出的一位交流者却不能正常地与人对话。进行采访前，人们必须预先提供访谈问题。若干年前，为霍金工作的职员提醒我在采访过程中不要与他闲谈，因为他即便是回答最简短的问题，都要花很长时间去遣词造句。然而，当终于和他会面时，我激动得忍不住脱口而出：“你好吗？”——于是只能内疚地等待他回答。他很好。

在他位于剑桥的办公室里，有一块写满了方程的黑板。宇宙学当中需要使用很多非常罕见的数学语言。不过，霍金对科学研究的特殊贡献恰恰就是驾驭一些显然是属于不同专业领域的方法：其中最为人所知的是，他是最早将原本设计用来探索原子内微小粒子的科学手段应用于研究广袤太空的人。

在这个极端复杂的研究领域，霍金的同事们也许会担心，大众永远

无法理解他们的研究。不过，霍金的一个明显特征恰是力争赢得更广泛的受众。在2016年的BBC里斯讲座中，他游刃有余地将毕生对黑洞的洞见凝缩在两次15分钟的讲演中。对于那些好奇却同时感到困惑，或者着迷于这思想却害怕科学的读者，我在关键点上都附加了注解，希望能有助于理解。



黑洞没有毛吗？

有人说，事实有时比小说更不可思议，没有什么比黑洞的情形更体现这点了。黑洞比科幻作家的任何异想天开都更怪异，但它们却是已经被科学证明了的存在。科学界不仅较晚才意识到大质量恒星可在自己的引力作用下往恒星中心坍缩，而且在对坍塌后留下的天体和物质的行为的相关思考也很迟缓。1939年阿尔伯特·爱因斯坦甚至写了一篇论文断言，因为物质只能有限度地被压缩，所以恒星不能在自身引力作用下坍缩。许多科学家都赞同爱因斯坦的这个直觉判断。而在反对者当中，最主要的大概要数美国科学家约翰·惠勒了。他在诸多方面都是历史上推动黑洞理论的英雄。他在20世纪50年代和60年代的研究中强调，许多恒星最终会坍缩，并指出了这种可能性给理论物理学带来的问题。他还预见到坍缩的恒星转变成的天体，也就是黑洞的许多性质。

DS："黑洞"这个词字面意思很简单，但是要想象在太空中某处一个真实存在的黑洞则比较困难。试着想象有一个巨大的下水口，水盘旋着流入其中。任何东西一旦滑过这个下水口开始下倾的边缘——对应黑洞当中所谓的"事件视界"——就无法返回。因为黑洞是如此强有力，甚至连光都会被它们吞没，所以我们实际上看不到它们。不过科学家知道它们的确存在，因为黑洞会将靠其太近的恒星撕裂开来，与此同时向太空中发出振荡波。最近一项有重大意义的科学成果就是探测到了正是超过十亿年前两个黑洞碰撞产生的所谓的"引力波"。

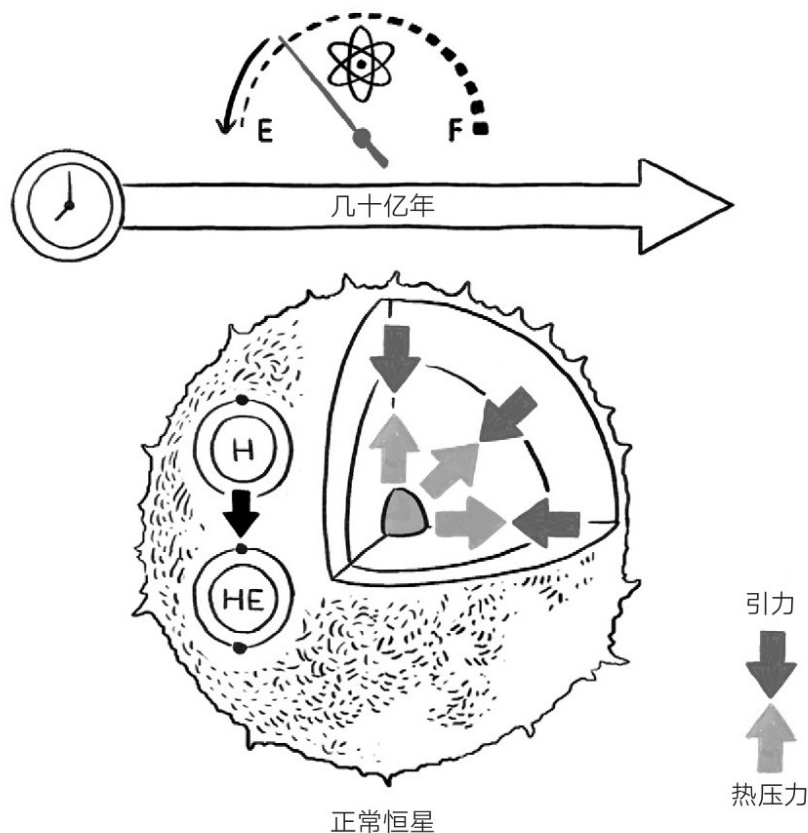
在一颗正常恒星的几十亿年寿命的大部分时间里，支持恒星对抗自身引力的力量来自于恒星内部的热压力，而热压力产生于将氢转变成氦的核反应过程中。

DS：美国航空航天局用高压锅来比喻恒星。恒星内部的核聚变的爆炸力产生了向外的压力，将一切都往内拉的恒星自身引力把这压力约束在恒星内部。

然而，恒星最终必将耗尽它的核燃料，失去与自身引力对抗的热压力。这时候恒星就会收缩。在某些情形下，它可能变成一颗"白矮星"而支持自身。然而，1930年萨拉玛尼安·钱德拉塞卡证明，白矮星的质量大小是有上限的，其最大质量是太阳质量的1.4倍。苏联物理学家列夫·朗

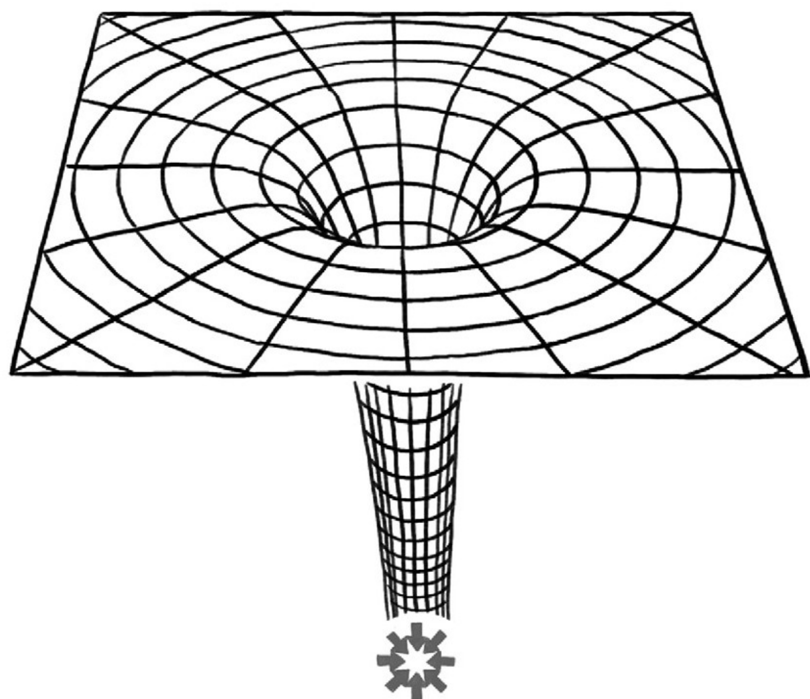
道对全部由中子构成的恒星计算出类似的最大质量。

DS：白矮星和中子星都曾是像太阳那样的恒星，而其内部的核燃料已经燃烧殆尽。由于失去了使之胀大的力量，无法阻止自身引力拉力将其缩小，于是它们就变成了宇宙中的某些最致密的天体。不过在恒星的大小排名表上，这些恒星却是相对较小的，这意味着它们的自身引力大小不足以使恒星完全坍缩。因此，史蒂芬·霍金和其他人最感兴趣的问题是，最大的恒星在到达其生命终点时会发生什么？



那么，当那无数拥有比白矮星或中子星更大质量的恒星耗尽它们的核燃料时，它们的命运又如何呢？罗伯特·奥本海默，后来的原子弹之父，研究了这个问题。1939年，在和乔治·沃尔科夫、哈特朗德·斯奈德合作的两篇论文中，他证明了，这样大质量的恒星，其内部向外的压力不足以支持自己；而且如果你在计算中忽略压力，那么一颗均匀的球面

对称的恒星就会收缩到具有无限密度的单独的一点。这样的一点被称为奇点。



DS：一个奇点是由一颗大质量的恒星被压缩到难以想象的小的点时的结局。这个概念一直是史蒂芬·霍金研究生涯的典型主题。它不仅有关恒星的终结，还有关形成整个宇宙的起点的更远为基本的观念。正是霍金关于这些的数学研究为他获得了世界性的声誉。

我们有关空间的所有理论都是在假定时空是光滑和几乎平坦的基础上表述的。所以这些理论在奇点处都崩溃了，因为在那里的时空曲率为无限大。事实上，奇点标志着时间本身的终结，这也正是爱因斯坦对之持有异议的原因。

DS：爱因斯坦的广义相对论认为，物体使围绕它们的时空变形。想象放在一张蹦床上的一个保龄球，它会改变蹦床布料的形状，使得其他较小的物体朝它滑去。人们通常用这种办法来比喻和理解引力效应。倘若时空的弯曲程度越来越厉害，最终变成无限大，在此处我们日常所熟知的时空规则就不再适用。

接着第二次世界大战来临。大多数科学家，包括罗伯特·奥本海默，都将注意力转向核物理，引力坍缩问题被大多数人遗忘了。而被称为“类星体”的遥远天体的发现重新激起了科学家们对这个研究课题的兴趣。

DS：类星体（quasar）是宇宙中最明亮的一类天体，也可能是迄今为止能够被检测到的最遥远的天体。这名字是“类恒星射电源天体”（quasi-stellar radio sources）的缩写，而且它们被认为是围绕黑洞涡旋的物质盘。

第一颗类星体3C273发现于1963年。此后，更多类星体很快相继被发现。尽管它们距离地球非常非常遥远，在地球上看来却异常明亮。这意味着它们释放出了远大于一般天体的能量，单纯的核反应产生的能量无法和如此大的能量输出匹配，因为核反应仅仅使用了天体静质量的一小部分，也仅仅将这一小部分质量作为纯粹能量释放出来。而其他可能提供这么大能量的源头，只有因引力坍缩释放的引力能。恒星的引力坍缩就这样被重新发现。

我们已经清楚地了解到，一颗均匀的球状的恒星有可能收缩成具有无限大密度的一点，即奇点。爱因斯坦方程在奇点处失效。这表明，在拥有无限密度的此点，人们不能预言未来。这接着意味，每当一颗恒星坍缩时，就会发生某种奇怪的事情。如果奇点是裸的，也就是说，如果它们没被事件视界遮蔽，那我们就要受到可预见性崩溃的影响。

DS：一个“裸”奇点是一个理论场景，此处恒星虽然坍缩，却没有形成围绕它的一个事件视界，也因此该奇点就能被看到。

当约翰·惠勒在1967年引进“黑洞”这个术语时，它取代了早先的“冻星”的名字。惠勒新造的词强调，坍缩恒星残余本身是有趣的，而与它们如何形成无关。新名字很快就流行起来。这个词让人联想到某种黑暗而神秘的东西。但是，法国人，模式化的法国人，却察觉到了这个词更下流的一层意思。他们排斥trou noir这个名字好多年（trou noir：法语中的黑洞，在某些俚语当中也会被用作骂人的话），断定这是个淫秽的词语。不过，这就像要抵制le weekend（法语中的周末，源自英语）和其他法式英语一样。最终他们只好屈服。何人能够抵制一个如此大获全胜的名字呢？

在黑洞外部，你不可能知道它里面是什么。你能把电视机、钻戒甚

至你最恨的敌人扔进一个黑洞，可黑洞所能记忆的一切只不过是总质量、旋转的状态和电荷。约翰·惠勒把这一原理形象地称为“黑洞无毛”而闻名。而对法国人来说，这正坐实了他们的猜疑。

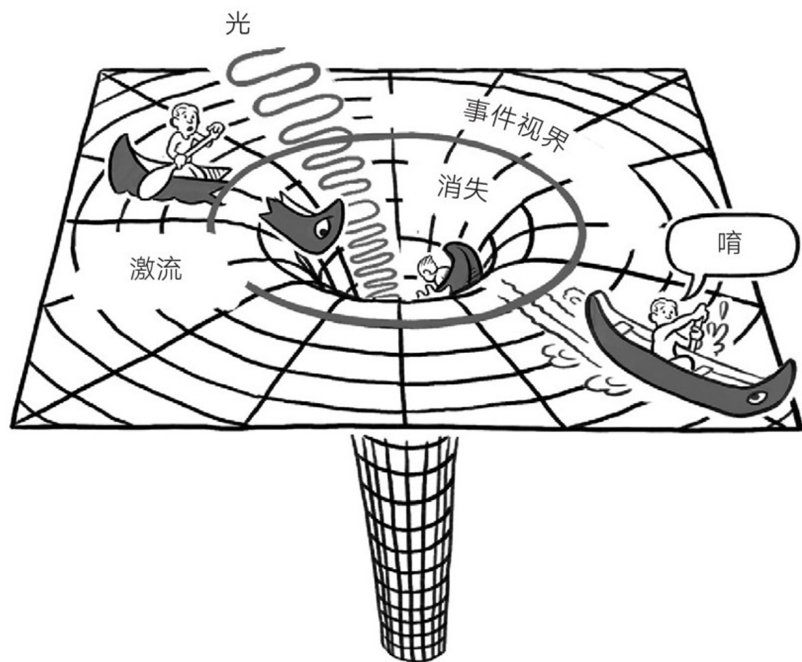


黑洞是有边界的，我们称之为事件视界。在视界上，引力的大小恰好足以把光拉曳到视界内并防止它逃逸。因为没有任何东西的速度比光还快，因此经过视界的所有其他东西也必然会被引力拉曳回去。穿过事件视界跌落到黑洞内部有点像乘独木舟顺尼亚加拉瀑布而下。在瀑布上游，如果你桨划得足够快，就能够逃脱掉下瀑布的命运，然而一旦到达了瀑布边缘，再怎么划桨都无济于事了，无法返回。你越靠近瀑布，水流就越急。这意味着，水流拉独木舟前部的力量比拉后部的力量更强大。当前后的拉力相差太多时，独木舟就将面临被拉断的危险。黑洞的情形也是类似的。如果你脚在前而头在后向一个黑洞落去，因为脚更接近黑洞，脚所在处的引力比头所在处的引力更大。这个力差将导致你的身体沿着纵向被拉长，而横向被挤瘦。如果这个黑洞拥有几倍我们太阳的质量，那么在你抵达视界之前就已被撕开并变成像意大利面条那么细。然而，倘若你向质量大得多的黑洞落去，比如质量是太阳质量的100万倍的黑洞，你就将轻而易举地到达视界。因此，如果你要探索黑洞的内部，确保选取一个大的。在我们银河系中心就存在一个质量约为

400万个太阳质量的黑洞。

DS：科学家们相信，在几乎所有星系的中心都有一个巨大的黑洞——鉴于这个观念的有关特征首次被确认也才是不久以前的事，更让人感到了这个观念多么令人惊奇。

尽管在你落入黑洞时，自己不会注意到任何特异之事，但是在远处观察你掉入黑洞过程的人永远看不到你越过事件视界的瞬间。在这个观察者的眼里，越接近视界，你运动的速度就显得越缓慢，而且就在外头徘徊。观测者眼里的你也会随着接近视界的过程变得越来越红，越来越暗淡，直到你实际上从他的视野里消失。就外部世界而言，你已经永远消失了。



DS：由于光不能从黑洞逃逸出来，从远处观察你的任何人都无法真正地目击你越过视界的过程。在太空中没人能听见你的尖叫；而在黑洞里，没人能看到你失踪。

1970年的一个数学发现，极大地推动了我们对这些神秘现象的理解。这就是事件视界——即围绕黑洞的边界区域——的表面积具有如下性质，当额外的物质或辐射落入黑洞时，事件视界的面积总会增加。这

个性质暗示，黑洞的事件视界面积和传统牛顿物理之间，特别是和热力学中的熵的概念之间存在相似之处。你可以将熵理解为对于一个系统的混乱程度的测度，或者等效地，是对其精确的态的知识的缺失。著名的热力学第二定律断言，熵总是随时间增加。1970年的发现首次暗示了视界面积和熵之间的关键联系。

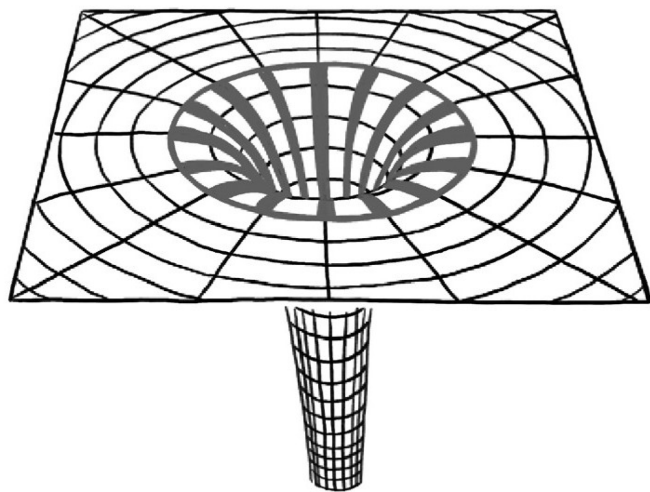
DS：熵增意味着任何有序的事物随时间流逝而变得较混乱无序的倾向——打个比方，就像整齐垒着的砖头形成一堵墙（低熵），随着时间流逝，这堵墙最终将变成一堆杂乱的尘埃（高熵）。而这个从有序到混乱的过程可由热力学第二定律来描述。

虽然熵和事件视界面积之间存在明显的联系，但面积怎么会和黑洞本身的熵等同，对我们来说却一点都不清楚。黑洞的熵指的是什么呢？1972年，雅各布·柏肯斯坦提出了一个关键的设想，那时他是普林斯顿大学的一名研究生，后来在耶路撒冷的希伯来大学任教。其来龙去脉如下。当引力坍缩产生一个黑洞，它就快速地在一个静态安顿下来，这个态只用三个参数就能表征：质量、角动量（旋转的状态）和电荷。除了这三个性质，黑洞不保留已坍缩的天体的任何其他细节。

在宇宙学家的信息的意义上，这一定理对于信息论隐含了如下思想：在宇宙中的每个粒子和每个力对“是与否”问题都有隐含的答案。

DS：在这个语境里，信息是指与一个天体相关的每个粒子和每个力的所有细节。某物越是混乱无序，它的熵越高，就需要越多的信息去描述它。正如物理学家兼广播员吉姆·阿尔-卡里里说的那样，一副彻底洗过的纸牌比没洗过的拥有更高的熵，因此要描述它就需要更多得多的解释，或者信息。

事件视界





质量



角动量



电荷

柏肯斯坦定理意味着，在引力坍缩中，大量信息被丢失了。例如，黑洞最后的态与坍缩物体是由正物质还是反物质构成无关，与坍缩物体是球状的还是高度无规的形状无关。换言之，一个给定质量、角动量和电荷的黑洞可由大量不同的物质位形中的任一种——包括大量不同种类的恒星当中的任意一种坍缩形成。的确，如果不考虑量子效应，那么物质可能位形的数目会是无限多的，因为黑洞可能由巨大不确定数目、具有不确定低的质量的粒子的云团坍缩而形成。不过，位形的数量真能无限多吗？这就是量子效应参与进来之处。

量子力学的不确定性原理表明，只有其波长比该黑洞本身尺度还要小的粒子才能形成黑洞。这表明组成黑洞的粒子的可能波长范围是有限的：它不能是无限的。

DS：由著名的德国物理学家沃纳·海森伯在20世纪20年代构思出的不确定性原理陈述道：我们永远不能确定或预言最小的那些粒子的精确位置。因此，在所谓的量子尺度之下，自然中存在一个模糊性，和艾萨克·牛顿描述的精确有序的宇宙截然不同。

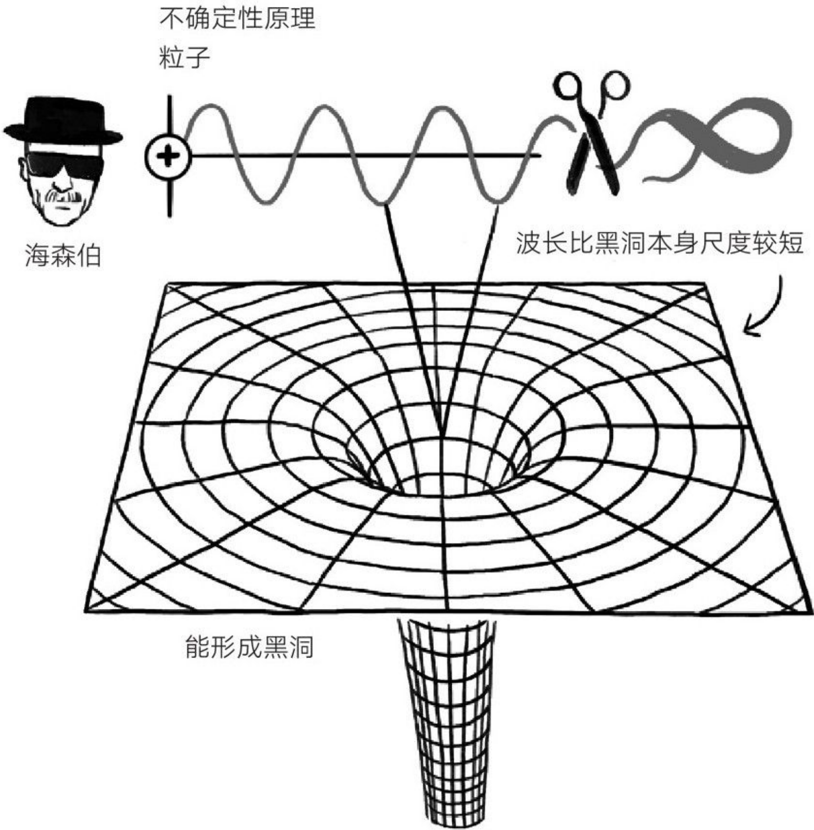
因此，能够形成一个具有给定质量、角动量和电荷的黑洞的位形的数目尽管非常巨大，却也是有限的。雅各布·柏肯斯坦提出，人们可以由这一有限数目推出黑洞的熵。这将是对黑洞创生时在坍缩过程中丢失且

无法挽回的信息量的测度。

柏肯斯坦的设想有一个显然致命的瑕疵，如果黑洞拥有与它事件视界面积成比例的有限的熵，那么它还应该拥有一个有限的温度，该温度要与其表面引力成比例。这就意味着，黑洞可以在某一非零的温度下，和热辐射处于平衡中。然而，根据经典概念，这类平衡是不可能的。因为黑洞会吸收所有落到它上面的热辐射，但根据定义却不能反过来发射任何东西。它不能发射任何东西，也不能发射热辐射。

如果信息被丢失，这显然是在黑洞中发生的DS：

事，那就应该释放一些能量——这就和任何东西都不能从黑洞出来的理论相悖。



这是一个矛盾的情形。而这正是我在下一次讲演中将要继续探讨的

内容之一。届时我将探索黑洞如何挑战宇宙的可预见性，以及历史的确定性的最基础原理；并且谈谈如果你被吸进了一个黑洞，将会发生什么。

DS：史蒂芬·霍金就这样带领我们进行了一次科学旅行：从爱因斯坦的恒星不能坍缩的断言，到人们接受黑洞的确存在的这个事实，直至关于黑洞的这些怪异特征如何存在和作用的各种理论之间的冲撞。



黑洞并不像想象的那么黑

我在前面的讲演中留下了一个悬念：关于由恒星坍缩产生的不可思议的致密的天体——黑洞性质的佯谬。有理论提出，具有完全相同性质的黑洞可由无限种不同类型的恒星形成。但是也有理论认为，可能形成具有相同性质的黑洞的恒星类型的数目是有限的。这是一个信息论问题，那就是说，宇宙中的每个粒子和每个力对“是与否”问题都拥有隐含的答案。

就像科学家约翰·惠勒说的那样，“黑洞无毛”，因此人们从外部无法得知黑洞内部是怎样的，除了它的质量、旋转状态和电荷这三样信息。这表明，黑洞内部隐藏着大量外部世界无法得知的信息。如果隐藏在黑洞内部的信息量取决于黑洞的尺度，人们从一般的原理就能预料到，黑洞将会拥有一个非零的温度，而这意味着黑洞将会发出热辐射，就会像一块炽热的金属一样发光。但那是不可能的，众所周知，没有任何东西可以从黑洞中逃逸出来。或者说，那时人们就是这么认为的。

这个佯谬直到1974年初，我利用量子力学研究黑洞邻近的粒子行为时才被打破。

DS：量子力学是极小空间尺度下的科学，它探索解释最小尺度的粒子行为。这些粒子不遵循制约像行星那样巨大得多的物体的运动定律，也就是说，它们不遵循艾萨克·牛顿创立的定律。利用这种极小空间尺度下的科学去研究大尺度时空是史蒂芬·霍金的开创性成就之一。

使我大吃一惊的是，根据我的研究和计算，黑洞似乎是在以稳定的速率发射粒子。和当时所有人一样，我坚信黑洞不能发射任何东西。因此，我相当努力地试图摆脱这一令人难堪的效应。但是，我越苦思冥想，就越难以拒绝承认其正确性，所以最后我只好无奈地接受了这个发现。最终使我确信它是一个真实存在的物理过程的理由是，飞离的粒子的谱是精确地热性的。我的计算预言，黑洞会产生并发射粒子和辐射，恰如其他普通的热体一样，其拥有的温度与其表面引力大小成正比，即和它的质量大小成反比。

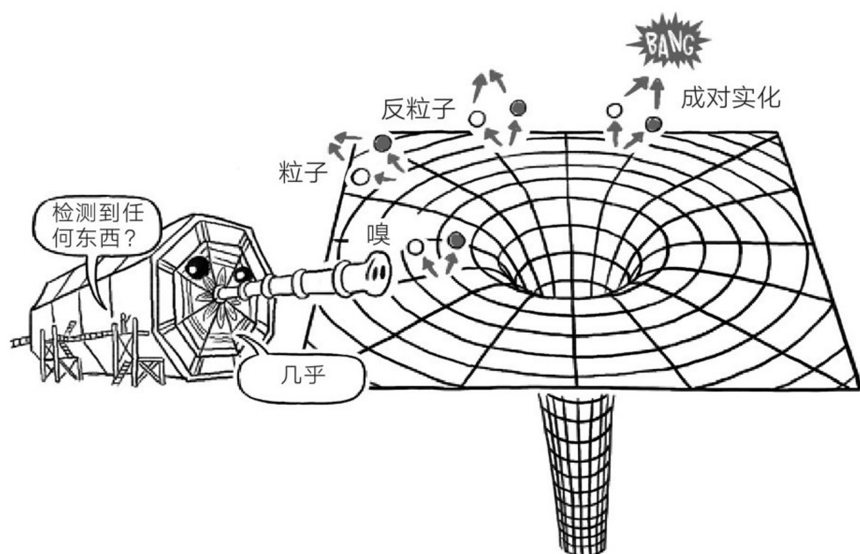
DS：这些计算首次证明，黑洞不一定是只进不出的通往死地的单行

道。自然而然地，该理论所提出的辐射被称为“霍金辐射”而闻名。

自此，黑洞发射热辐射的数学证据也逐渐被其他科学家用各种不同的手段所确认。下面让我试着解释这些发射是如何产生的，但这并不是理解该理论的唯一方法。量子力学表明，整个空间充满了虚粒子和虚反粒子组成的虚粒子对，它们不断在空间中成对地成为实体，分离，然后再次碰撞并相互湮灭。

DS：这个概念取决于真空从来就不是空无一物的这个思想。根据量子力学的不确定性原理，总存在粒子出现的机会，不管它们存在的时间多么短暂。而这个过程总是牵涉到拥有相反特征的粒子对，它们出现并消失。

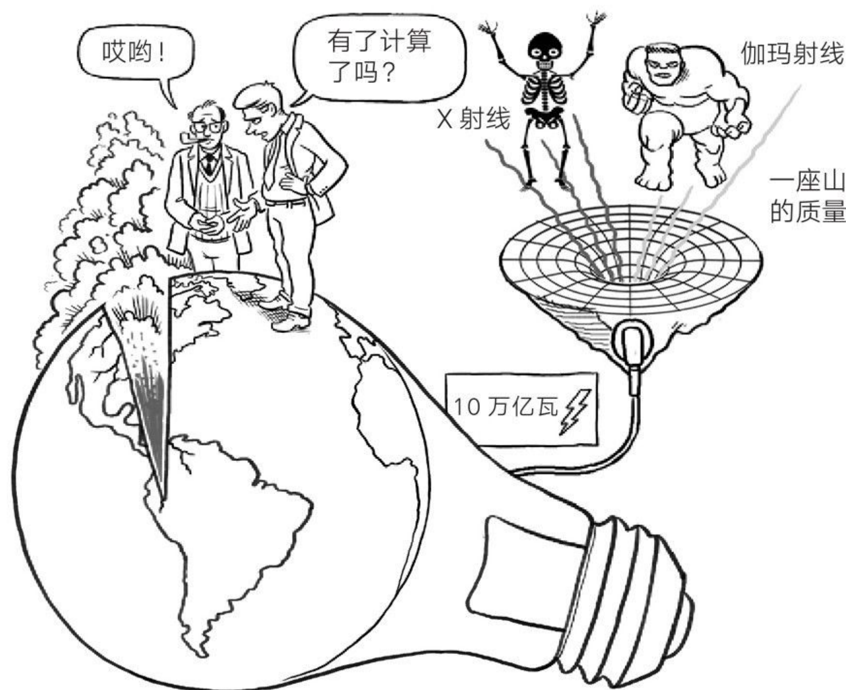
这些粒子之所以称作“虚的”，那是因为不像实粒子那样，我们不能用检测器直接观察到它们。尽管如此，可以测量到它们的间接效应，而且所谓的兰姆移动的一种小移动证实了它们的存在。兰姆移动指的是它们在受激的氢原子发射的光谱能级上产生的分裂。现在，在黑洞的场合，虚粒子对中的一个成员可能落进黑洞，留下了失去伴侣的另一成员，因而这个成员无法湮灭。被遗弃的粒子或反粒子有可能随它的伴侣落入黑洞，但是它也有可能向无限逃逸，这样的粒子就作为从黑洞发射出的辐射而出现了。



DS：这一部分理解的关键点在于，通常无人注意到虚粒子对的形成

和消失。不过，如果这个过程恰巧正发生在黑洞的边缘，虚粒子对中的一个粒子可能被拖曳进去，而另一个却没有。那么，逃逸的粒子就会显得似乎正被黑洞“吐出来”。

一个太阳质量的黑洞泄出粒子的速度非常非常慢，以至于我们不可能检测到该过程。然而，如果有质量小得多的“微”黑洞，比如说一座山那么重的黑洞。像山那么重的黑洞会以大约10万亿瓦的速率辐射出X射线和伽玛射线，足以给整个地球提供电能。然而，要控制并利用这样一个微黑洞绝非易事。你不能直接把它放在发电厂，因为它会穿过地板不断往地心落去，并在地心处停下来。如果我们拥有这样的一个黑洞，那保管它的唯一方法就是把它放到环绕地球的轨道上。



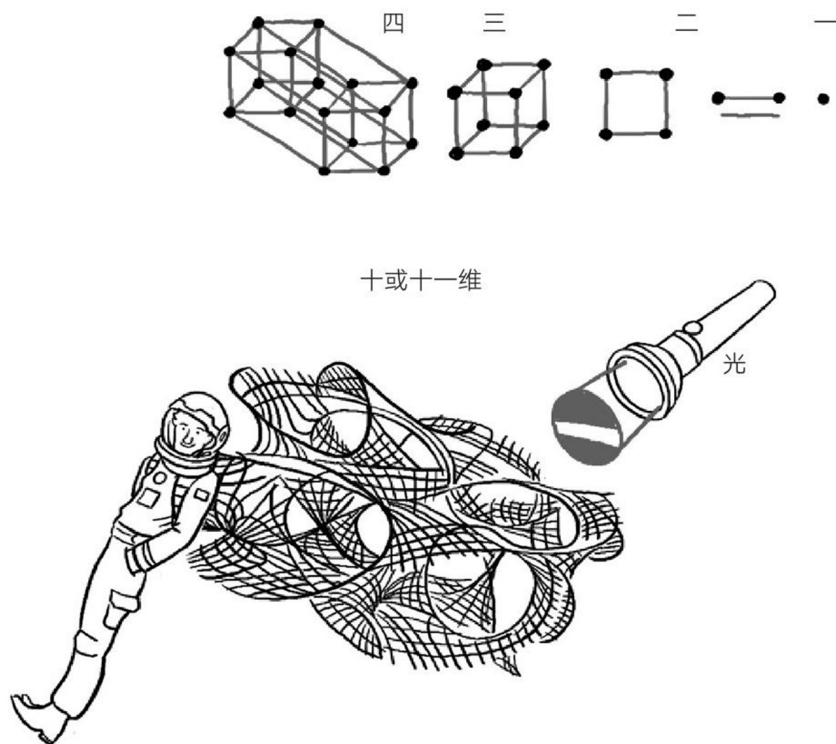
人们曾经试图寻找过这样的微型黑洞，但迄今还未找到。真是太可惜了，如果他们找到了微黑洞，那我就能获得诺贝尔奖了！不过要证明我的理论还有其他方法，那就是我们也许能够在时空的额外维度当中制造微黑洞。

DS：这些“额外维度”是指，超越我们所有人在日常生活中都熟悉的

三维，也超越时间的第四维的某种东西。在试图解释引力为何比诸如磁力等其他自然力都弱得多的过程中，人们引出了这个思想——也许引力在平行的其他维度里也必须起作用。

根据某些理论的理解，我们体验的宇宙只是在十维或十一维空间中的一个四维面。影片《星际穿越》当中也体现了这个理解。因为光无法通过这些额外维度，而只能通过我们所处宇宙的四个维度传播，所以我们看不见额外维度。然而，引力却会影响额外维度，并且引力在那里的作用比在我们的宇宙中强大得多。因此，在额外维度中形成小黑洞要容易得多。在瑞士的欧洲粒子物理研究所的LHC，即大型强子对撞机的实验中，我们也许有机会能观察到这样的现象。在LHC当中有一条周长达到27千米的圆形隧道，两束粒子沿着相反方向围绕这个隧道飞行，并且最终被强迫碰撞。有些碰撞也许会产生微黑洞。这些黑洞会以一种容易被辨认的模式发射出粒子，我们可以通过这个方式来验证我的理论。所以我终究有可能得个诺贝尔奖的！

只有当一个理论经受了时间的检验，即实际DS：



上已有确凿的证据证明其正确性后，诺贝尔物理学奖才会颁发给它的发现人。例如，彼得·希格斯是早在20世纪60年代就提出存在某种粒子的科学家之一，这种粒子能赋予其他粒子以质量。将近50年以后，人们才在大型强子对撞机的两个不同的检测器上找到了后来被确认为希格斯玻色子真实存在的证据。这是理论科学和工程学、睿智的理论和扎实的工作共同的胜利；最终彼得·希格斯和弗朗索瓦·恩格勒，一位比利时科学家，共同获得了这项诺贝尔奖。霍金辐射还未获得物理证明，而一些物理学家甚至暗示，要检验这个理论过于困难，几乎是不可能的。不过，随着对黑洞越发深入的研究，霍金辐射被证实存在的时刻终究会到来的吧。

随着粒子从黑洞逃逸，黑洞将损失质量，并且收缩。而这个行为将使粒子发射率增大，也就是说黑洞损失质量的速率将越来越大。最后，黑洞将会失去它的全部质量并且消失。那么已落进黑洞的所有粒子和倒霉的航天员的命运将会如何呢？当黑洞消失时，他们当然不可能就这么重新出现了。在我们看来，除了总质量、旋转的量和电荷，之前落入黑洞的物体的信息全部丢失了。但是，如果这些信息真的全部丢失了，就会造成一个直击我们现有的科学理解核心的严重问题。

在此前两百多年的岁月里，我们都坚信科学的决定论性，也就是说，宇宙的演化遵循科学定律。皮埃尔——西蒙·拉普拉斯构思并表述了这一原理，他说，如果我们知道某一时刻宇宙的状态，就能够利用科学定律确定它在未来和过去所有时刻的状态。据说，拿破仑曾经问过拉普拉斯，在他的理论当中，上帝起了什么作用，而拉普拉斯回答道：“阁下，我不需要假设上帝在我的理论当中起了任何作用。”我认为拉普拉斯的这句话并不是在断言上帝不存在——只是说上帝不干预世界使之违背科学定律。这点必然是每位科学家都确信的。科学定律如果只在某位超自然的存在决定让事物运行而不加干涉时才成立，那科学定律就不成其为科学定律了。

在拉普拉斯的决定论性中，人们为了预言未来，必须知道所有粒子在某时刻的位置和速度。然而，要预言宇宙的未来远没有这么简单，我们还需要考虑沃纳·海森伯在1923年提出的不确定性原理，这个原理是量子力学的核心。

该原理表明，你对粒子的位置测量得越精确，对它们的速度就只能测得越不准确，反之亦然。也就是说，你不能同时既准确地知道位置，

又准确地知道速度。在这个情况下，要怎样才能精确地预言未来呢？答案是，虽然我们不能准确地分别预言粒子未来的位置和速度，却仍能预言粒子未来拥有的所谓的“量子态”。通过所谓的量子态，就能够在一定精确程度上计算出粒子的位置和速度。我们仍然期望宇宙决定论性可以成立，只不过需要稍微改变一下说法，如果我们知道在某一时刻宇宙的量子态，科学定律应使我们能预言它在其他任何时刻的量子态。

DS：从解释发生在事件视界的事情开始，我们已经不断深入探索了科学中某些最重要的具有哲学意味的主题——从牛顿机械世界到拉普拉斯定律到海森伯不确定性，还探索了这些原理或者定律是在哪些地方遭遇了黑洞奥妙的挑战。最重要的是，根据爱因斯坦的广义相对论，进入黑洞的信息消失了，而量子理论说明它不能被销毁。

如果信息在黑洞中丢失，我们就不能预言未来，因为黑洞可能发射出任何一堆粒子。它甚至能发射出一台好使的电视机，甚至是一套真皮精装的莎士比亚全集，尽管这种奇异的发射概率极其微小。你可能会觉得，就算我们不能预言从黑洞里会跑出什么东西来，也没啥大不了的，反正在我们周围没有任何黑洞。不过，这是个原则问题。如果决定论性，也就是宇宙的可预见性在牵涉到黑洞时失效，那它在其他情形下也会失效。更糟的是，如果决定论性失效，那么我们也就无法确定我们过去历史的真实性。我们的史书和记忆可能仅仅是幻觉。正是我们的过去决定了我们的现在存在；没有了历史的真实性，我们就失去了自己的本体。

因此，信息在黑洞中是否真的丢失了，或者在原则上它是否能被恢复，是一个非常重要的研究课题。许多科学家觉得信息是不应该丢失的，但没人能提出一个能保存信息的机制。关于这个课题的争论持续了多年。最后，我找到了自以为是正确的答案，它依赖于理查德·费恩曼的下面这个思想，存在许多不同的可能的历史，每种历史都有其发生的概率，而非一个单独的历史。在这个情形下，存在着两大类历史。其中一类，空间中存在一个黑洞，粒子可以落入这个黑洞；在另一类历史中，空间中不存在黑洞。



关键在于，我们无法从外部断定，是否存在一个黑洞。因此，总有不存在黑洞的概率。这个可能性就足以保存信息，不过这信息不以非常有用的方式返回。这有点像把一部百科全书烧毁。如果你保留所有的烟和灰，这部百科全书的信息并没有丢失，只是变得非常难以阅读。科学家基普·索恩和我同另一位物理学家约翰·普列斯基尔曾经打赌，我和基普认为信息会在黑洞中丢失。当我发现这种保存信息的方式时，我承认赌输。我输给了约翰·普列斯基尔一部百科全书。也许我应该就给他书的灰烬。

DS：在持宇宙的完全决定论观点的理论中，你能烧毁一部百科全书，而且接着重新构建出它——前提条件是，你知道组成这部百科全书的墨水和纸的每个分子的每颗原子的特征和位置，并且一直跟踪着它们的一切的话。

目前，我正和剑桥的同事马尔科姆·佩里以及哈佛的安德鲁·斯特罗明格研究基于所谓超平移的数学思想的新理论，以期解释使信息从黑洞返回外部的机制。根据我们的理论，信息被编码到了黑洞的视界上。敬请期待我们在未来发表进一步的消息！

DS：在录制了里斯讲演后，霍金教授和他的同事发表了一篇论文，该论文从数学上论证了信息能被储存在事件视界里。该理论依赖于信息在一个称为超平移的过程中，被转变成两维的全息图。正如在这个讲演

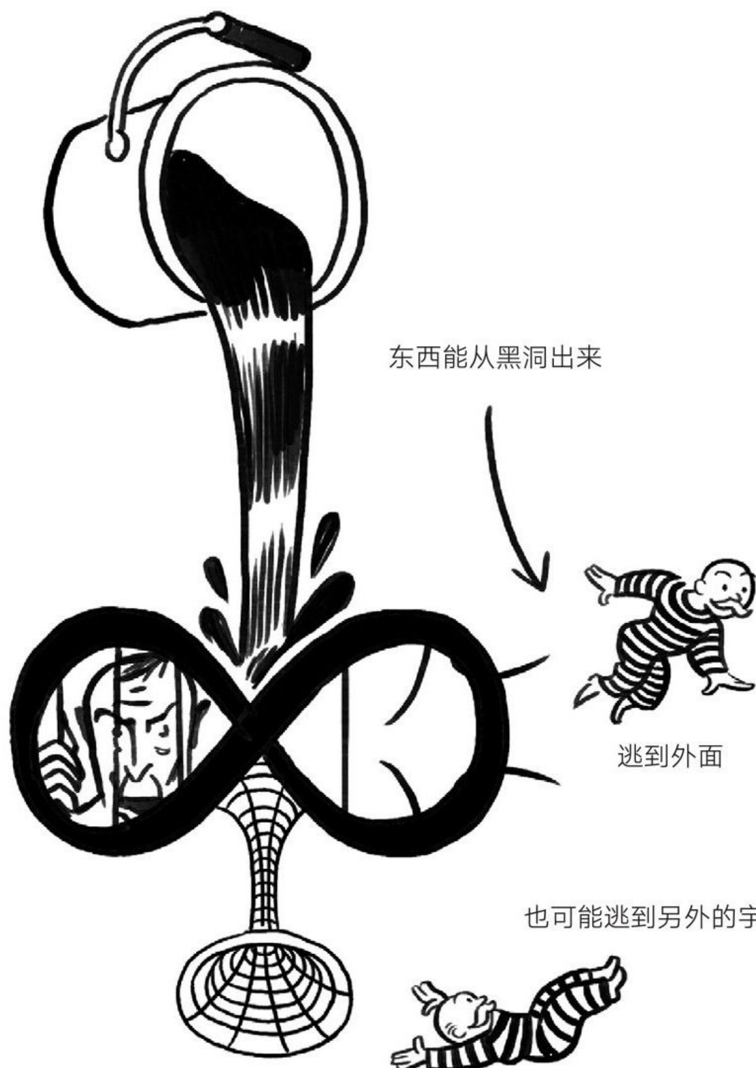
之末复制的摘要所展现的，这篇题为“黑洞上的软毛”的论文为我们提供了这个领域的深奥语言的清晰一瞥，并为我们展现了科学家们试图解释它所面临的挑战。

对于落入我们所在的宇宙的一个黑洞当中的物体有没有可能从另一宇宙出来的问题，前面讨论对我们有什么提示？存在具有和不具有黑洞的两大类可选择性历史暗示，物体有可能落入某个黑洞，从另一个宇宙出来。但是这个黑洞必须很大，并且如果它在旋转的话，那么它也许具有一个通往另一宇宙的通道。但是你一旦进去了，就再也不能回到现在所处的宇宙当中了。因此，尽管我很热爱太空飞行，但并不准备去尝试穿越一个黑洞。

如果一个黑洞在旋转，那么它的核心有可DS：

能不是由一个无限密度的奇点构成，而是可能存在一个环形的奇性。而正是这导致了不仅落入黑洞而且穿越它的可能性的猜想，尽管这意味着离开我们已知的这一宇宙。史蒂芬·霍金用这一撩人的想法结束了演讲：在黑洞另一边也许存在一些东西。

那么，我想要在此给你们的留言是，黑洞并不像想象的那么黑。和我们曾经想象的不同，它们不是一度想象的永久的囹圄。落入其中的物体可以从黑洞逃逸，既可逃回到这个宇宙来，还可逃到另一个宇宙去。因此，如果你觉得自己掉进一个黑洞里，永远不要放弃，总有方法能逃出来！


东西能从黑洞出来
逃到外面
也可能逃到另外的宇宙去

黑洞上的软毛

史蒂芬·霍金+，马尔科姆·佩里+和安德鲁·斯特罗明格*

应用数学和理论物理系，数学科学中心，

剑桥大学，剑桥，**CB3 0WA**，英国

*自然基本定律中心，

哈佛大学，剑桥，**MA 02138**，美国

摘要

最近已被证明，在所有渐近闵可夫斯基时空的引力论中，BMS超平移对称意味着无数个守恒律。这些定律要求黑洞携带大量软（即零能量）的超平移的毛。类似地，麦克斯韦场的存在隐含着软的电磁的毛。本文按照软引力子或软光子来详尽描述黑洞视界上的软毛，而且证明有关它们量子态的完整信息被储存在视界未来边界的全息版上。荷守恒给出拥有不同软毛而其余都相同的黑洞的蒸发结果之间的无数个精确关系。我们还进一步论证，物理上可实现的过程无法激起在空间上定域至比普朗克长度更小得多的软毛，由此推出软的自由度的有效数目和以普朗克单位度量的视界面积成正比。

注：此文已发表于：Phys.Rev.Lett.116，231301（2016）.

Soft Hair on Black Holes

Stephen W. Hawking[†], Malcolm J. Perry[†] and Andrew Strominger[*]

[†]*DAMTP, Centre for Mathematical Sciences,*
University of Cambridge, Cambridge, CB3 0WA UK
[*] *Center for the Fundamental Laws of Nature,*
Harvard University, Cambridge, MA 02138, USA

Abstract

It has recently been shown that BMS supertranslation symmetries imply an infinite number of conservation laws for all gravitational theories in asymptotically Minkowskian spacetimes. These laws require black holes to carry a large amount of soft (*i.e.* zero-energy) supertranslation hair. The presence of a Maxwell field similarly implies soft electric hair. This paper gives an explicit description of soft hair in terms of soft gravitons or photons on the black hole horizon, and shows that complete information about their quantum state is stored on a holographic plate at the future boundary of the horizon. Charge conservation is used to give an infinite number of exact relations between the evaporation products of black holes which have different soft hair but are otherwise identical. It is further argued that soft hair which is spatially localized to much less than a Planck length cannot be excited in a physically realizable process, giving an effective number of soft degrees of freedom proportional to the horizon area in Planck units.

附录　黑洞极简史

吴忠超

在牛顿力学中，每个天体都有一个逃逸速度，从天体表面飞离的投掷体的初始速度只有超过它，投掷体的动能才能转换成足够的势能，使自己永远摆脱该天体的引力场。显然，如果世间万物有一最大的速度，那么当天体足够致密，也就是其表面的引力足够强大时，任何物体都无法挣脱这个天体的引力场，包括光粒子。所以这样的天体只能吞噬东西，绝不能释放物质，也不能发射光，因此它是看不见的。拉普拉斯说的“宇宙中的最大星体可能是看不见的”就是这个意思。他心目中的这种不可见的恒星就是20世纪中期被惠勒命名为黑洞的天体。其实剑桥的米歇尔早于拉普拉斯几年就首次提出了黑洞的思想。

万物具有最大速度这一思想显然和伽利略相对性原理相冲突。因为我们可以很容易选取另一个惯性系，在新的坐标系中看，这个上限就被突破了。

1865年麦克斯韦根据以他名字命名的方程组预言了电磁波的存在，并推导出其在真空中传播的速度是光速，由此断言光是电磁波的一种形式。1888年赫兹用实验证实了电磁波的存在，那已是麦克斯韦死后九年。

爱因斯坦认为，如果麦克斯韦理论在所有惯性系中都成立，这也是相对性原理所要求的，那么就只好放弃一些旧观念，如同时的绝对性等。他把时间和空间合并成四维的时空，而不同惯性系的时空坐标之间必须进行洛伦兹变换。这就是他在1905年发现的狭义相对论的精义。狭义相对论还认为，真空中的光速正是万物最大的速度。

要把引力和狭义相对论相合并绝非轻而易举。因为引力和其他的相互作用非常不同。传说中1590年伽利略在比萨斜塔做的自由落体实验表明，物体的惯性质量和引力质量相等。这个思想被爱因斯坦精炼为，在升降机中的乘客无法区分引力和惯性力，这就是所谓的等效原理。他进一步提出，引力应由弯曲时空的度规来体现，物理定律在任意坐标系中都采取同样的形式，而时空度规应满足他于1915年发现的以他名字命名

的场方程。这标志着广义相对论的诞生。物质的能量动量张量是引力场的源，而物质又在场中运动。用惠勒的话说：物质告诉时空如何弯曲，时空告诉物质如何运动。

广义相对论是相对性原理、光以及引力三者和谐共存的理论。只有在这个理论中才能建立黑洞的自洽模型。

史瓦兹席尔德早在1915年，在广义相对论诞生一个月后不久就找到了爱因斯坦场方程的第一个非平坦时空的准确解，正是这个解描写了真空中的无旋转的黑洞的度规。这篇论文是爱因斯坦推荐发表的，但发表时作者已病故。爱因斯坦在此前进行有关水星近日点进动的计算，以及对光线在掠过太阳表面时偏折的预言，用的其实就是这个解的近似表述。有趣的是，如果把黑洞的所谓视界当成它的表面，那么由广义相对论推出的黑洞大小恰和从牛顿引力推出的大小一样。尽管如此，爱因斯坦却认为物质不可能紧致到能形成黑洞，他在1939年断言黑洞不存在。黑洞的第二个重要的解则迟至1963年才被克尔发现，那是描写在真空中旋转的黑洞度规。

1928年钱德拉塞卡提出，在恒星内部的核燃料耗尽时，由于阻挡不住自身的引力而向其中心坍缩，形成致密恒星。如果它的质量小于1.4倍太阳质量即钱德拉塞卡极限时，则可能是白矮星，超过这个极限则不是。现在我们知道，当该质量比这高但又比3.2倍太阳质量即奥本海默——沃尔可夫极限低时，则可能是中子星，甚至夸克星。当这个质量超过这第二个极限时就产生黑洞。

1939年奥本海默描绘出致密恒星向黑洞演化的场景，在星体表面趋近于要形成的黑洞视界尺度时，恒星发出的光谱极端红化，星体变得极度黯淡，直至光线完全消失。同样，一个落向黑洞的航天员在远处的同伴眼里也是如此，似乎他永远在视界附近徘徊。而航天员本人在刚进入巨大黑洞时不会感到任何异样，并未意识到他已跨过一扇永远不可返回的地狱之门——黑洞的视界。没有任何东西包括光线可以从黑洞里和视界上逃逸出来。而且，如果航天员穿过一个较小黑洞的视界，那么巨大的引力潮汐作用就会把他撕碎！

从1967年至1971年，引力物理学家们达到共识，在恒星引力坍缩成黑洞的过程中，星体的大量无规性会被产生的引力波带走。坍缩演化的终态是只用三个参数表征的一个黑洞，这三个参数是质量、角动量和

电荷。这就是所谓的“黑洞无毛定理”。有关坍缩前的恒星的大量信息全部丢失了。无毛定理使得黑洞研究变得极度纯粹，并直击自然的核心奥妙，所以可以说，黑洞和宇宙一样是科学研究的最美对象。

在经典引力物理中，霍金的最主要贡献除了1970年前证明的广义相对论的奇性定理外（和彭罗斯合作），便是1970年发现的黑洞视界面积不减定理：黑洞的视界面积永远不可能减小，当多于一个黑洞合并时，其总的视界面积也如此。

这个定理有一个重要的推论，由黑洞碰撞产生的引力辐射能量必须有个上限，这正是2015年首次发现的引力波的场景。

因为视界面积不减的定理和热力学第二定律可以相类比，所以1972年柏肯斯坦将黑洞视界面积猜测为黑洞的熵的度量，它代表黑洞坍缩时描写其微观状态的所有信息的丢失。但是在经典物理的框架里，黑洞不能发射任何东西，所以温度应该为零。因此黑洞具有以视界面积为度量的熵就和热力学第三定律相冲突。这个左右为难只有在考虑量子效应后才得以解决！经典引力和热力学的共动就这样将量子论扯进来。这使人想起在科学史上，正是对黑体辐射的热力学研究，才使普朗克开启了量子世界的大门！

1974年霍金在研究物质受黑洞散射的问题时在理论上发现了后来称为霍金辐射的现象。他发现在一个恒星坍缩形成黑洞的时空背景里，原先真空的量子场，在形成黑洞后演化成从视界附近发射出的粒子流，这些粒子流具有黑体的热谱，其温度由视界的表面引力来度量。在史瓦兹席尔德黑洞的情形，该温度和黑洞质量成反比。因此随着黑洞辐射，黑洞质量降低，温度升高，辐射加剧，如此反复正反馈，使黑洞以最后的爆发而告终。其他黑洞的情形也大体一样。

从黑洞辐射场景可以推出，黑洞的熵果然是以视界面积来度量。准确地说，在所谓的普朗克单位下，熵等于视界面积的四分之一。

霍金辐射的理论发现是引力物理自爱因斯坦后的最伟大成就。在这个场景中，引力论、量子论和热力学得到了优美的统一。

但是，具有一个太阳质量的黑洞的辐射温度只有百万分之一开的数量级，它被淹没在2.7开的宇宙背景微波辐射之中，根本无法被检测到。因此，为了观测到霍金辐射，人们寻找宇宙早期由于密度起伏引起的微

小黑洞，但迄今还未找到这类黑洞。

严格地讲，真正太初黑洞必须和宇宙同步创生。在量子宇宙学的框架中，人们发现在闭合的宇宙中，黑洞创生的相对概率是系统熵的指数函数，而在开放的宇宙背景中，它是系统负熵的指数函数。

1999年帕里克和威尔切克利用隧穿的观点来研究霍金辐射，辐射粒子的半经典发射率被表达成黑洞熵改变的指数函数。这个研究还具有的独立意义是，它计算出在势垒因粒子隧穿过程本身而改变的情形下的该粒子穿透率。

在霍金辐射的场景中，如果黑洞在蒸发后完全消失，那么引力坍缩前的纯态就转变成霍金辐射的混合态，因此坍缩前的物质的信息丢失了，即量子论的可预见性丧失了。这就是折磨了物理学界四十年的黑洞信息佯谬。

柏肯斯坦猜测黑洞的熵被均分在视界上。受此启发，特胡夫特猜测黑洞内部时空区域的自由度总数与其视界的面积成比例。循着这个思路，20世纪90年代初人们发展出全息原理。1997年马尔达西那提出的规范场和引力的对偶性是全息原理的最成功实现。这种对应在一定程度上解决了黑洞信息佯谬。在五维的反德西特时空中的黑洞对应于它无限边界上的四维平坦时空中的规范场。而后者进行酉演化，所以黑洞的演化也应如此，因此信息不应丢失。

那么在黑洞的场景，落入粒子的信息如何在霍金辐射中重现呢？

诺特定理说，任何对称性都拥有与之对应的守恒的荷。1962年，人们发现在渐进平坦时空的类光无限存在超平移对称，这种对称隐含着无数由偏振标识的与之相关的荷的守恒律。所谓软引力子正是携带这种荷，不具有能量，但具有不同角动量的粒子。对应于电磁场也存在类似的软光子。

2015年霍金意识到在静止黑洞的视界也存在这样的超平移对称。与此相关的守恒的荷称为引力的软毛，这是和黑洞的质量、角动量和电荷的硬毛相对照的。全息版处于视界未来边缘上。落入的粒子在视界上植上这种软毛，相当于引起视界的超平移，它刺激全息版上的像素，即在那里创生软引力子。同理，电流在穿越视界时也在那里创生软光子。这么丰茂的软毛只有在量子的框架中才能被看到，而在经典的框架中只能

显现前面提到的三根硬毛。

霍金、佩里和斯特罗明格断言，如果落进黑洞的粒子的空间局域尺度小于普朗克长度，则无法激发视界上的像素，软粒子自由度的数目和以普朗克单位量度的黑洞视界面积成比例。但超平移的像素还太稀疏，不足以完全记录穿越视界物质的信息，即不足以完全体现柏肯斯坦——霍金熵。于是他们猜测，如果穷尽黑洞视界拥有的所有对称及其相关联的荷，尤其是超旋转，则柏肯斯坦——霍金熵必然会被充分体现出来。自然从来不会让我们失望，除非还有更神妙的场景在前面等待。

在量子引力中，由于软粒子的存在，真空不像过去以为的那样，不是唯一的，而是无限简并的。在黑洞形成和蒸发过程中，与超平移等对称相关的荷必须守恒，最终的真空态和热的霍金辐射相互关联，以保持纯态。因此，落入黑洞粒子的信息被恢复，可惜其形式是混沌的，所以信息并没丢失，但我们无法读出它的含义。

目前，霍金、佩里和斯特罗明格正在沿着这个思路继续进展，黑洞信息佯谬可望即将得到彻底的解决。

科学界认为黑洞辐射是霍金最伟大的贡献，但他最自豪的却是量子宇宙学的无边界设想。如果将他的成就凝缩成两句话，那应该是：

黑洞辐射贯通引力量子信息，

无边界律呈现宇宙无中生有。

2016年夏，杭州望湖楼

史蒂芬·霍金年表

1942年

1月8日出生于牛津，父亲是弗朗克，母亲是伊莎贝尔。父亲曾在牛津学习医学，母亲曾在牛津学习哲学、政治学和经济学。为了躲避二战的轰炸，伊罗贝尔离开他们在伦敦海格特的住处，去牛津生下史蒂芬。因为英国和德国在二战有个协定。不轰炸牛津、剑桥、哥廷根和海德堡。

1959年

进入牛津大学的大学学院学习物理学。

1962年

10月被剑桥大学三一堂学院录取，攻读博士学位，师从邓尼斯·西阿玛。

1963年

被诊断患肌肉萎缩性侧索硬化症（ALS）。

1965年

被选为龚维尔和基斯学院研究员。7月和简·王尔德结婚，

1966年

3月获得博士学位，博士论文的题目是《膨胀宇宙的性质》。他的论文“奇性和时空几何”

获亚当斯奖。

1968年

和彭罗斯合作的论文“引力坍缩和宇宙学”获引力研究基金会奖第二名。

1970年

和彭罗斯发表论文“引力探索的奇性和宇宙学”，论证如果宇宙服从广义相对论并满足某些合理的物理条件，必然起始于一个奇点。证明黑洞视界面积不减，即黑洞力学第二定律。1970年代初和卡特、伊斯雷尔、罗宾孙的研究结果强有力地支持惠勒的黑洞无毛定理。

1971年

论文“黑洞”获引力研究基金会奖第一名、发表论文“碰撞黑洞引起的引力辐射”。

1972年

发表论文“广义相对论中的黑洞”。

1973年

和乔治·艾利斯合著的《时空的大尺度结构》出版，和巴丁与卡特提出黑洞力学四个定律。转向研究量子引力。

1974年

发表论文“黑洞爆炸么？”，宣布发现霍金辐射，引力论、量子论和热力学在该场景中得到统一，被选为英国皇家学会会员。

1975年

获爱丁顿奖章和庇护十一世金奖，后者是狄拉克推荐的。

1976年

获海因曼奖、麦克斯韦奖和休斯奖。

1977年

被任命为剑桥大学引力物理教授。和吉朋斯开创引力热力学的研究，所发现的宇宙视界的热性隐含着宇宙结构的起源。

1978年

获爱因斯坦奖。

1979年

被选为剑桥大学卢卡斯数学教授。

1981年

提出黑洞里的信息被无可挽回地丢失。在梵蒂冈会议上提出“宇宙的边界条件是它没有边界”的无边界设想，在原则上解决了第一推动问题。获富兰克林奖章。

1982年

和吉朋所在剑桥组织召开“极早期宇宙”研讨会，发表论文“单泡暴涨宇宙中的无规性的发展”，这是最早研究宇宙结构起源的论文，获英国女王颁布的CBE勋章。

1983年

和哈特尔发表论文“宇宙的波函数”。

1985年

首次访问中国，并在中国科技大学和北京师范大学做讲演。在瑞士做切除气管手术，从此依赖电脑和语音合成器进行交流。获皇家天文学会金奖。

1887年

获狄拉克奖章。

1988年

4月《时间简史》出版。和彭罗斯共获沃尔夫奖。

1989年

获阿斯图里亚斯王子奖，获英国CH勋章。

1993年

和吉朋斯合编的《欧氏量子引力》出版。《霍金讲演录》出版。

1994年

和彭罗斯在剑桥牛顿研究所作六次讲演，讲稿被编成《时空本性》一书，于1996年出版。

1995年

和简·王尔德离婚。和伊莱恩·梅森结婚。

1998年

获安德鲁·格曼特奖。

1999年

获内勒奖、阿尔伯特奖章和利林菲尔德奖。

2001年

《果壳中的宇宙》出版。

2002年

被BBC民调选为100名英国有史以来最伟大人物的第25名。邱吉尔第1名。达尔文第4名。莎士比亚第5名。牛顿第6名，图灵第21名。法拉第第22名，伊丽莎白二世女王第24名，麦克斯韦第91名。

2005年

发表论文“黑洞中的信息丢失”。

2006年

较科普利奖章。和伊莱恩·梅森离婚。决定把全部科学著作的简体中文版交湖南科学技术出版社出版。

2007年

和女儿露西合作的童书《乔治的宇宙：秘密钥匙》出版，随后几年

又出版了四本系列续集。进行零引力飞行。

2008年

获丰塞卡奖。

2009年

从剑桥卢卡斯数学教席退休。获总统自由奖章。

2010年

和蒙洛迪诺合著的《大设计》出版。

2013年

获俄国特别基本物理学奖。自传《我的简史》出版，

2015年

7月20日帮助发起寻找外星人的突破性规划，并试图得到“我们是否孤独”的答案，获BBVA

基础前沿知识奖。

2016年

和佩里与斯特罗明格发表论文“黑洞的软毛”，试图彻底解决信息丢失问题。

史蒂芬·霍金睿语

尽我一生，我一直着迷于我们面临的大问题，并且努力为之寻找科学的答案。如果你像我那样，凝视星空，并试图理解你之所见，你也会开始惊讶，何物使宇宙存在。

我所做的仅是证明，宇宙起始的方式可以取决于科学定律。在那种情形下，没有必要哀求上帝去决定宇宙如何起始。这并非证明没有上帝，只是说上帝是不必要的。

我们在理解科学之前，很自然相信上帝创造了宇宙。不过现在科学提供了更令人信服的解释。我说“我们就会通晓上帝的精神”是指，如果存在上帝的话，我们就通晓上帝通晓的一切，不过上帝不存在。我是一名无神论者。

除非相信在宇宙的背后存在某种超级的力量，否则你无法领会宇宙的辉煌。

科学预言从无中自发创生出许多五彩缤纷的宇宙。我们在哪个宇宙中纯属运气。

我相信上帝不存在是最简单的解释。没有东西创生了宇宙，也没有任何东西掌握我们的命运。这导致我深切地意识到，也许不存在天堂，也没有来世。我们拥有此生以鉴赏宇宙的大设计，对此我极度感恩。

我坚信这种可能性。尽管我们如此渺小，如此微不足道，我们仍能完全理解宇宙。当你仰望浩渺的太空，深感自卑，你是对的。我们确实极为渺小，但是我们能够完成宏伟的事业。

在宗教和科学之间存在基本的差别，前者基于权威，后者基于观察和理性。科学有效，所以必定胜出。

在科学对现象或不同观测的联系给出简单解释时，它是美的。

生物学的双螺旋以及物理学的基本方程便是其中的例子。

我认为21世纪将是复杂性的世纪。我们已经发现了制约物质的基本

定律，并且理解了所有正常的情况。我们不知道如何将这些定律相互协调，也不知在极端条件下会发生什么。不过我预料本世纪某时我们将会发现一个完备的统一理论。利用那些基本定律，我们能够建立的复杂性是没有限度的。

我们需要寻求我们行动的最大价值。

我把大脑当成计算机，计算机的元件坏了就停止运行。对于一台毁坏的计算机而言，没有天堂和来生，那是惧怕黑暗的人的童话。

现在我们一切人都由互联网相连接，犹如巨大头脑中的神经元。

有些人会说，诸如爱、喜悦与美属于和科学不同的范畴，不能以科学的观点来描述，不过我认为现在用进化论可以解释它们。

在一个政治、社会和环境混乱的世界，人类何以再维持一百年?我没有答案。我提这个问题的缘由，是要让人们深思，并且意识到我们现在面临的危险。

挑衅性，这一人类最大的恶癖，将毁灭文明。

政府只有在大众监督之下才能良好运行。缺乏监督必定滥权。

几百万年来，人类动物般地生活。后来发生了焕发我们想象力的事件。我们学会说话，学会聆听。语言实现了思想交流，使人类协作去实现本不可能的事业。人类最伟大的成就来自于交最糟糕的失败起源于封闭。没有必要封闭。我们最伟大的希望在将来会变成现实。借助于触手可及的技术，其可能性是无限的。我们要做的一切就是保持交流。

我们面临着若干威胁：核子战争、全球温化和遗传工程化病毒。尽管某年在地球上发生灾难的概率也许甚低，鉴于在时间长河上的积累，此后千年或万年就几乎肯定逃脱不了。到那时我们应已扩散到太空中，并到其他星球上，因此这并不意味着人类的末日。然而至少此后百年间我们还不能在太空建成自持的殖民地。因此，在此期间我们必须非常小心。

如果外星人到访我们，其后果就很像哥伦布登陆美洲，对于原住民就是厄运。

我们处于因自身的贪婪和愚蠢将自己毁灭的危险。处于微小的日益污染并拥挤的行星上，我们不能只顾自身。

我们面临的大多数威胁来自于我们在科技上取得的进步。我们不会停止进步，甚至倒退回去，因此我们必须认清这危险并控制之。我是一名乐观主义者，并且相信我们能做到。

我们的人口和对地球行星的有限资源使用，伴随着向好的或坏的方向改变我们环境的技术能力，都正在指数式地增长。科学和技术正出乎意料地改变着我们的世界，保证这些改变朝向正确就非常重要。

在一个民主社会中，这意味着人人都得对科学有基本理解，以便对未来做出知情决定。

媒体需要科学的超级英雄，正如生活中的任何领域。

我仅是一个永不长大的儿童，仍然不停地追问“如何”与“为何”。

当我21岁时，我的期望值降低到零。此后的任何东西都是额外惊喜。

我已经在面临早夭的前景下存活了49年。我不怕死，不过我也不急于去死。我有这么多忙着要做的事情。

对于我的残疾生气仅是浪费时间。人们总得继续生活，而我做得不差。如果你总是生气或抱怨，无人有时间陪你。

保持活跃的头脑和幽默感对我的存活至关重要。

努力理解你所观察到的，并琢磨是什么引起宇宙存在。保持好奇心，无论生命多么艰难，你总是有所作为，并获得成功。重要的仅是永不放弃。

我想做的事太多。我痛恨浪掷光阴。

无论生活多么糟糕，你总是有所作为，并获得成功。生命不息，希望永存。

我对别的残疾人的忠告是，专注于你的残疾不应妨碍你完成的事业，而不徒然为受其阻碍而无法进行的事业悲伤。千万不要因身体伤残

而精神也伤残。

如果我必须选取一位超级英雄，我会挑选超人。他拥有我所没有的一切。

如果你被难倒时，暴怒无济于事。我的做法是不停地思考该问题，不过同时研究别的东西。有时我等待好多年才见曙光。在信息丢失和黑洞的情形，我花了29年。

夸耀自己的智商者皆为失败者。

智慧是随机应变的能力。

人各不同，但共享相同的人类精神。也许那正是我们适应并存活的人类本性。

我在英国接受了最佳的医疗照顾，我觉得澄清这一点很重要。我相信普遍保健的价值。我不怕这么说。

她们完全是神秘。（关于女人）

首先，要志向远大，而非目光短浅。第二，永不言弃。工作赋予你意义和目标。没有它生命变成空虚。第三，如果你非常幸运地找到爱，守住它，千万不要将它抛弃。（给小孩的忠告）

如果下次有人抱怨你犯了错误，就告诉他那也许是件好事。因为如果没有缺点，你我都不会存在。（论缺点）

我不想将它和性相比，但它持续得更久。（论科学发现的惊喜时刻）